

Aku Valmu

# Hiilidioksidimittalaitteet teollisiin sovelluksiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

4.11.2016

Tekijä Otsikko	Aku Valmu Hiilidioksidimittalaitteet teollisiin sovelluksiin
Sivumäärä Aika	56 sivua 4.11.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sulautetut järjestelmät
Ohjaajat	HW-testi-insinööri Jarno Parttimaa Yliopettaja Antti Piironen
<p>Tässä Vaisala Oyj:lle tehdyssä insinööriyössä mitattiin työn tilaajan hiilidioksidimittalaitteen ja sen kolmen kilpailijan suorituskykyä. Tarkoituksena oli selvittää, millaiseen soveltuvuuteen erilaiset anturin toteutustavat johtavat.</p> <p>Suorituskykyä testattiin neljällä eri tavalla. Mittaustarkkuustestissä tarkkailtiin laitteiden kykyä näyttää oikein erisuuruisissa pitoisuuksissa. Vasteaikatestissä tarkkailtiin laitteiden kykyä ja nopeutta reagoida ympäristön hiilidioksidipitoisuuden muutoksiin. Mittaus lämpötila-alueen yli -testissä mitattiin laitteen kykyä näyttää oikein myös kovissa olosuhteissa. Laitteiden elinikätestausta suoritettiin altistamalla laite olosuhteeseen ja tarkkailemalla, miten laitteen näyttämä reagoi pitkiin ajanjaksoihin rasituksessa.</p> <p>Laitteet myös purettiin koteloistaan ja tutkittiin, millaista teknologiaa niiden sisältä löytyy. Laitteista pyrittiin löytämään anturin ja koteloinnin toteutustavan ja suorituskyvyn yhteyksiä ja pohdittiin, mitkä ratkaisut toimivat ja mitkä eivät.</p> <p>Insinööriyö paljasti, miten työn tilaajan mittalaitteen suorituskyky vertautuu kilpaileviin laitteisiin, ja työn tuloksia pystytään hyödyntämään markkinoinnissa tuotteen vahvuuksia esiteltäessä. Mittalaite suoriutui kilpailijoitaan paremmin mittaustarkkuudessa, vasteajassa, lämpötilaolosuhteessa mittaamisessa ja stabiilisuudessa. Työn tulokset myös perustelevat tilaajan patentoidun mikrohehkun ja Fabry–Pérot'n interferometrin käyttöön perustuvan anturitekniikan käytön järkevyyttä.</p>	
Avainsanat	Hiilidioksidianturi, optinen mittaus, infrapuna, teknologiavertailu

Author Title	Aku Valmu Performance comparison of carbon dioxide meters
Number of Pages Date	56 pages 4 November 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information Technology
Specialisation option	Embedded Systems
Instructors	Jarno Parttimaa, HW Test Engineer Antti Piironen, Principal Lecturer
<p>This project was done to determine how the carbon dioxide measurement probe GMP252 of the client company compares to its competitors. The goal was also to observe how differences in the products' methods of implementation are reflected in their performance.</p> <p>The products were tested in terms of measurement accuracy, response time, temperature dependency and stability. The products were also disassembled and their mechanics and optics were investigated. Their methods of implementation were compared to test results in order to determine their effectiveness.</p> <p>In the tests conducted, the GMP252 outperformed all of its competitors which validates the usage of the client's patented microglow technology and the Fabry–Pérot interferometer in infrared gas sensor implementation. The tests also showed what kinds of problems its competitors are struggling with, and what their approaches to sensor implementation and product specification are.</p> <p>The results will be available for the client's internal use and will support marketing the product's advantages over its competitors. The results will also be of use in planning of future products and their product specifications.</p>	
Keywords	Carbon dioxide probe, optical measurement, infrared, technology comparison

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Hiilidioksidin mittaaminen	2
2.1	Mittauksen historia	2
2.2	Mittauksen sovellukset	3
2.3	Kemiallinen mittaus	5
2.4	Optinen mittaus	5
2.4.1	NDIR-anturit	8
2.4.2	Fabry–Pérot'n interferometri	12
2.4.3	Ideaalikaasulaki	12
2.4.4	Laitteiden sisäinen laskenta	14
3	Hiilidioksidimittalaitteet	16
3.1	Hiilidioksidimittalaitteiden ominaisuudet	16
3.1.1	Mittausalue	16
3.1.2	Mittautarkkuus	16
3.1.3	Kohina	18
3.1.4	Vasteaika	18
3.1.5	Lämpötila- ja paineriippuvuus	19
3.1.6	Toimintaolosuhteet	19
3.1.7	Tiiviys ja kestävyys	20
3.1.8	Stabiilisuus	22
3.1.9	Start-up- ja warmup-aika	22
3.2	Akkreditoitu kalibrointi	22
3.3	Testattavat laitteet	23
3.3.1	Vaisala GMP252 -mittapää	24
3.3.2	E+E 870 -mittapää	25
3.3.3	SenseCube KCD-HP100A -mittapää	27
3.3.4	E+E 820 -seinälähetin	30
4	Hiilidioksidimittalaitteiden testaus	31
4.1	Mittautarkkuus	32
4.2	Vasteaika	34
4.3	Mittaus lämpötila-alueen yli	35

4.4	Pitkän ajan stabiilisuus	35
5	Testitulokset	37
5.1	KCD-HP100A:n testauksessa ilmenneet skaalaamisongelmat	37
5.2	Mittaustarkkuus	38
5.3	Vasteaika	40
5.4	Mittaus lämpötila-alueen yli	41
5.5	Pitkän ajan stabiilisuus	44
6	Tulosten tulkinta	46
7	Johtopäätökset	50
	Lähteet	52

## Lyhenteet

ALT	<i>Accelerated Life Testing</i> . Testi, jolla testataan laitteen elinikää kiihdyttämällä sen ikääntymistä esimerkiksi altistamalla se rankalle olosuhteelle.
FPI	<i>Fabry-Pérot interferometer</i> . Laite, jolla voidaan mitata ja hallita läpi päästettäviä valon aallonpituuksia.
IP	<i>Ingress Protection</i> . Standardi, jolla määritellään eri tasoja nesteen ja pölyn suojaukselle.
MEMS	<i>Micro-electromechanical sensor</i> . Komponentti, jossa yhdistellään pieniä, mikrometriluokkaa olevia rakenneosia isommaksi kokonaisuudeksi.
NDIR	<i>Non-dispersive infrared sensor</i> . Anturityyppi, jossa infrapunasäteily kulkee mittaustilan läpi muovaantumatta.
ppm	<i>Parts per million</i> . Suhdeluku, joka kuvaa osuutta miljoonasta. Hiilidioksidin mittauksessa useimmiten käytetään tilavuuksien suhdetta.
RH	<i>Relative humidity</i> . Ilmassa esiintyvän veden määrä ilmoitettuna prosentteina määrästä, jolla se saturoituisi samassa lämpötilassa.
SATP	<i>Standard Ambient Temperature and Pressure</i> . Normaali lämpötila ja paine (25 °C ja 1013,25 hPa).

## 1 Johdanto

Insinööriyön tarkoituksena on tutustua hiilidioksidimittauksen teollisiin sovelluksiin ja toimintaperiaatteeseen. Lisäksi testataan eri valmistajien laitteiden soveltuvuutta eri näisiin teollisiin sovelluksiin. Tavoitteena on parantaa ymmärrystä siitä, millaiseen soveltuvuuteen erilaiset anturin toteutustavat johtavat.

Työ tehdään Vaisala Oyj:lle, joka on yksi maailman suurimmista mittalaittevalmistajista ympäristön ja teollisuuden mittauksiin. Aiheeksi valittiin kilpailijoiden laitteiden testaus, sillä siitä saadaan arvokasta tietoa kilpailijoiden laitteiden suorituskyvystä niin markkinoinnin kuin tuotekehityksenkin tueksi.

Hiilidioksidi, kemialliselta kaavaltaan  $\text{CO}_2$ , on myrkytön, palamaton, väritön ja hajuton kaasu, joka muodostuu hiiliatomista ja kahdesta happiatomista. Kaikki elämä muodostuu hiileen perustuvista yhdisteistä, ja hiilidioksidi on yksi elämän edellytyksistä. Hiili kiertää jatkuvasti maailman merien, ilmakehän ekosysteemin ja geosfäärin välillä. Ilmakehässä hiili esiintyy pääosin hiilidioksidina. Kasvit käyttävät ilmakehän hiilidioksidia fotosynteesissä, jossa hiilestä muodostetaan sokeria, jota kasvit käyttävät muun muassa kasvamiseen. Eläimet syövät kasveja, ja näin hiili kiertää eläimen elimistön käyttöön, josta sitä uloshengitetään. Myös kasvien palamisessa ja eläinten mätänemisessä vapautuu hiilidioksidia. Merien ja ilmakehän välillä tapahtuu hiilen siirtymistä sateiden ja sedimentaation tuloksena. Meriin sitoutuu hiiltä pikkuhiljaa myös maaperästä. Fossiilisia polttoaineita polttamalla hiiltä vapautuu maasta ilmakehään. [1; 2.]

Hiilidioksia mitataan useista eri syistä. Sitä mitataan sovelluksissa, joissa liian korkea hiilidioksidin taso on haitallista, ja ilman laatua säädellään tämän mukaan. Näihin sovelluksiin lukeutuvat tarpeen mukainen ilmastointi ihmisten oleskelutiloissa kuten rakennuksissa ja kulkuvälineissä, eläinten kasvatus ja sääkaapit. Potentiaalisesti korkeiden hiilidioksiditasojen takia ihmisille vaarallisissa sovelluksissa, kuten virvoitusjuomien hiilihapotuksessa, viinin ja oluen valmistuksessa sekä hiilidioksidikaasun ja -jään valmistuksessa ja kuljetuksessa, hiilidioksidin tasoa tarkkaillaan jatkuvasti onnettomuuksien estämiseksi. Lisäksi on sovelluksia, joissa tietoisesti halutaan nostaa hiilidioksidipitoisuutta esimerkiksi parantamaan tuottavuutta tai säilyvyyttä: inkubaattorit, kasvihuoneet, sieniviljelmät, ruoan prosessointi ja pakkaaminen sekä hedelmien kypsytytys ja säilytys. Hiilidioksidia mitataan myös eri prosesseista sitä talteen otettaessa. [3.]

Kaasun hiilidioksidipitoisuuden ilmoittamiseen käytetään korkeissa pitoisuuksissa prosentteja (%) ja matalammissa pitoisuuksissa yksikköä ppm, *parts per million* – suhdelukua, joka kuvaa osuutta miljoonasta tilavuuden suhteen. Ilmakehän tyypillinen hiilidioksidipitoisuus on 350–450 ppm. Sisäilman hyväksyttävälle pitoisuudelle on määritelty lähteestä riippuen useita ylärajoja, esimerkiksi 800 ppm. Kasvien kasvatuksessa pyritään ylläpitämään noin 800–1800 ppm:n hiilidioksiditasoa kasvun optimoimiseksi [4]. Soluviljelyyn käytetyissä inkubaattoreissa tyypillisesti ylläpidetään 4–10:n %CO<sub>2</sub>-pitoisuutta sopivan pH-tason saavuttamiseksi [5]. Koska eri sovellusten optimaaliset hiilidioksidipitoisuudet eroavat huomattavan paljon toisistaan, on tarvetta monille eri mittausalueille optimoiduille hiilidioksidimittalaitteille. Hiilidioksidimittalaitteet voivat mittausalueen lisäksi erota toisistaan muun muassa hinnaltaan, tarkkuudeltaan, lämpötilariippuvuudeltaan, vasteajaltaan, pitkän ajan stabiilisuudeltaan, toimintaympäristöltään, fyysiseltä kooltaan sekä nesteen ja pölyn suojauksen tasoltaan.

Insinööriyön tavoitteena on perehtyä hiilidioksidin mittaukseen, sen sovelluksiin ja peruseräiteeseen. Tavoitteena on myös testata neljää eri hiilidioksidimittalaitetta ja niiden suorituskyvyn perusteella tehdä johtopäätöksiä siitä, miten eri toteuttamisvaihtoehdot vaikuttavat suorituskykyyn.

## 2 Hiilidioksidin mittaaminen

### 2.1 Mittauksen historia

Hengitysilmassa olevan hiilidioksidin pitoisuuden vaikutus terveyteen on ollut tiedossa pitkään. Jo vuonna 1858 hygienisti Max von Pettenkoffer painotti hiilidioksidin merkitystä rakennusten hengitysilmassa ja asetti hyväksyttävän pitoisuuden rajan 0,1 %:iin (1000 ppm). Vaarallisen korkeita pitoisuuksia esiintyy ihmisten aiheuttamien keskittymien lisäksi myös luonnossa, esimerkiksi kaivoksissa. Historiassa hiilidioksidin purkautuminen maaperästä kaivoksissa on aiheuttanut useita onnettomuuksia. Vaarallisia hiilidioksidipitoisuuksia kaivoksissa on yritetty havaita muun muassa jalkojen tasolla kannettavien kanarialintujen avulla. Koska hiilidioksidi on ilmaa tiheämpää ja kanarialinnut reagoivat korkeisiin pitoisuuksiin ihmisiä nopeammin, kanarialinnun kuolema auttoi havaitsemaan vaarallisen pitoisuuden hyvissä ajoin ennen ihmisille vaarallisia pitoisuuksia. [6.] Teknologian kehityksen myötä on kuitenkin päästy kehittyneempiin tapoihin hiilidioksiditasojen havaitsemiseksi.



Vuonna 1953 J. W. Severinghaus kehitti Hendersonin–Hasselbachin yhtälöä käyttäen pH-arvoon perustuvan tavan määrittää hiilidioksidin osittaispaineen verestä. Syksyllä 1954 Richard Stow esitti keksimänsä CO<sub>2</sub>-elektrodin, jonka pohjalta kehitettiin 1950-luvun loppuun mennessä ensimmäiset verenkaasuanalysointilaitteet. [7.] Kaasujen absorboimaan infrapunaan perustuvaa mittausta alettiin tutkia jo 1930-luvulla. Helmikuussa 1938 August Herman Pfundt patentoi laitteen, jossa hehkulampusta lähtevä valo kulki kaasun ja suotimen läpi sen tunnistavalle ilmaisimelle, kuten *thermopilelle* tai bolometrille. [8.] Kaasujen optista mittausta hyödyntävät laitteet ovat kuitenkin monimutkaisia ja hankalia tuottaa suurissa määrin, minkä takia optiset anturit ovat vasta viime vuosikymmeninä alkaneet saada jalansijaa teollisessa mittaamisessa.

## 2.2 Mittauksen sovellukset

Hiilidioksidin mittaamiselle on useita syitä ilman laadun tarkkailusta viinin valmistuksessa muodostuvan hiilidioksidin tarkkailuun ja kasvihuoneen kasvien kasvuolosuhteiden optimointiin. Tässä luvussa esitellään yleisimpiä mittauksen sovelluksia.

Yksi tärkeimmistä mittauksen sovelluksista on turvallisuus. Sovelluksissa, kuten hiilidioksidikaasun ja kuivajään tuottamisessa, säilyttämisessä, kuljettamisessa ja käyttämisessä, joissa pitoisuus voi nousta ihmiselle vaaralliselle tasolle, mitataan turvallisuussyistä hiilidioksidia. Käyttäjien tavoitteena on säästyä materiaalisilta ja henkilövahingoilta, mutta usein myös täyttää ulkopuolisten tahojen vaatimat turvallisuusvaatimukset. Turvallisuussyistä hiilidioksidia mitataan myös esimerkiksi oluen ja viinin valmistuksessa, virvoitusjuomateollisuudessa, teurastamoissa, kaivoksissa, tunneleissa, ydinvoimaloissa ja kylmäsäilytyksessä.

Ruoan tuottamisessa hiilidioksiditasoa mitataan ja mahdollisesti säädellään muun muassa virvoitusjuomateollisuudessa, olutpanimoissa, hiivan valmistuksessa ja kanojen ja karjan kasvattamoissa. Hiilihapotettu virvoitusjuoma sisältää yli 2000 milligrammaa hiilidioksidia litraa kohden, ja sen määrä vaikuttaa merkittävästi juoman laatuun. Hiilidioksidia mittaamalla ja sen mukaan säätämällä saadaan varmistettua, että taso on lopputuloksen kannalta paras. Hiivan valmistuksessa ympäröivän ilman pitoisuudella on suuri merkitys, koska liian korkeat tai matalat pitoisuudet vaikuttavat käymisprosessiin. Näissä prosesseissa tarkastellaan hiilidioksidia myös turvallisuussyistä. Käymisprosesseissa syntyy suuria määriä hiilidioksidia, mikä on turvallisuusriski. Myös virvoitus-

juomien pullotuksessa saattaa prosessista päästä ilmaan hiilidioksidia. Hiilidioksidin mittauksella on roolinsa kanojen hautomoissa, jossa kanojen kuoriutumisvaiheessa hieman koholla oleva CO<sub>2</sub>-taso parantaa tuottavuutta, mutta liian korkeana on haitallista kasvulle. [6.] Karjan kasvatuksessa eläimet ja lannoite päästävät paljon hiilidioksidia, jonka tasoa vaihdetaan [9]. Myös ruoan säilytyksessä käytetään hiilidioksidin mittausta. Esimerkiksi perunoiden säilytyksessä hiilidioksiditasoa pitää säädellä, sillä liian korkeat CO<sub>2</sub>-pitoisuudet vaikuttavat niistä valmistettujen tuotteiden kuten ranskalaisten perunoiden tai perunalastujen laatuun. [10.] Hedelmiä ja vihanneksia säilytetään ja kypsytetään tiloissa, joiden hiilidioksidipitoisuutta säädellään, sillä korkea pitoisuus parantaa säilyvyyttä, mutta toisaalta hidastaa kypsymistä [6].

Ruoka usein pakataan kaasuun, joka sisältää happea, typpeä ja hiilidioksidia tuotteelle sopivassa suhteessa estämään ruoan pilaantumista. Ruoan pakkaaminen hiilidioksidiin pidentää huomattavasti tuotteiden, kuten lihan, juuston, hedelmien ja vihannesten, elinaikaa. Esimerkiksi lihaa pakattaessa se haittaa bakteerien kasvamista, minkä takia liha säilyy pidempään. Se myös auttaa säilyttämään lihan kauniin värin. Pakkauksen laskeneesta pitoisuudesta voidaan myös havaita pakkauksen vuotaminen. Myös ruoan kuljetuksessa hiilidioksiditasot voivat nousta vaarallisille tasoille, minkä takia sitä tarkkaillaan. [10.]

Kasvihuoneissa ja sienien viljelyssä voidaan ilman hiilidioksidipitoisuutta säätelämällä parantaa kasvua ja kypsymistä jopa 50 % [6; 11]. 800–1800 ppm:n hiilidioksiditason on todistettu olevan optimaalinen kasvuympäristö valtaosalle viljelyskasveja, ja sen mahdollisimman hyvä ylläpitäminen vaatii mittausta ja säätelyä [4]. Normaalia ilmakehän pitoisuutta korkeammalla pitoisuudella saadaan kasvua parannettua, mutta jos pitoisuus on liian korkea, voi kasvamisen hidastua tai pysähtyä kokonaan [6].

Hiilidioksidimittalaitteita valmistetaan myös inkubaattorisovelluksiin. Inkubaattoreita käytetään pääosin soluviljelyyn ja muuhun biologiseen tutkimukseen. Solujen kasvu riippuu tiukasti ympäristön pH-arvosta. Solujen kasvatukseen käytetty alusta, elatusaine, säätelee viljelmän pH-arvoa ja toimii puskurina suojelemaan viljelmää epähalutuilta pH-arvon muutoksilta. Koska elatusaineen pH-arvo on hyvin herkkä CO<sub>2</sub>-tason muutoksille, käytetään ulkoista hiilidioksidia tason säätelämiseksi. Yleisesti kokeissa käytetään 4–10 %CO<sub>2</sub>:n hiilidioksidipitoisuuksia, mutta tasot voivat vaihdella. [5.]

Elintarvikkeiden ja juomien jäähdyttämiseen ja säilytykseen käytettävää kuivajäätä valmistetaan hiilidioksidista, ja sen valmistuksessa on tarpeen mitata siihen käytettävää hiilidioksidia [12].

### 2.3 Kemiallinen mittaus

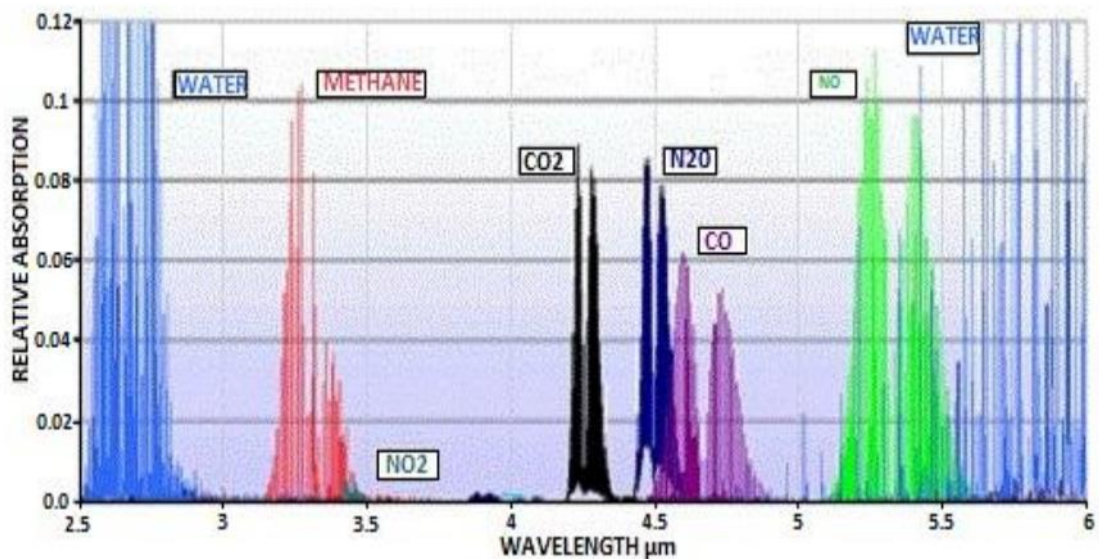
Hiilidioksidin kemialliseen mittaukseen on eri menetelmiä. Severinghaus-periaatteella toimivat membraanilla peitetyt elektrokemialliset CO<sub>2</sub>-anturit ovat olleet käytössä pitkään. Näillä mittapäillä hiilidioksidin osapaine määritetään mittaamalla pH-arvo vetykarbonaattiliuoksesta, joka erotetaan ympäröivästä aineesta, jota mitataan hiilidioksidin lävitseen päästävällä membraanilla. PH-arvo on tiukasti riippuva takaisin membraanin kautta elektrolyyttiin kulkevan hiilidioksidin määrästä. Näistä pH-arvon muutoksista saadaan laskettua hiilidioksidipitoisuus. Severinghaus-antureita voidaan käyttää hiilidioksidin mittaamiseen kaasun lisäksi myös nesteestä. Severinghaus-metodilla toimivien elektrokemiallisten antureiden lisäksi on kokeiltu myös konduktometrisiä ja lämmönjohdavuuteen sekä massaspektrometriaan perustuvia menetelmiä. Sovelluksesta riippuen vaatimukset anturille ovat erilaisia kestävyydestä, pitkän ajan stabiilisuudesta ja alhaisista ylläpitovaatimuksista pienikokoisuuteen ja nopeaan vasteaikaan. Kemiallisilla menetelmillä osa vaatimuksista voidaan täyttää hyvin, mutta toimintaperiaatetta, joka täyttäisi nämä kaikki samanaikaisesti, on hankala löytää. [6; 7; 13.]

### 2.4 Optinen mittaus

Optinen mittaus toteutetaan yleensä NDIR-antureilla, jotka käyttävät hyväkseen infrapunalle tapahtuvaa absorptiota eri kaasuissa. Se, absorboiko kaasu infrapunaa, riippuu kaasumolekyylin värähtelytyypeistä (*vibrational mode*). Kun kaasun läpi kulkee infrapunavaloa, osalla infrapunon spektriä on sama taajuus kuin kaasun molekyylien sidosten värähtelyllä. Näillä taajuuksilla valoa absorboituu, kun muilla taajuuksilla se jatkaa matkaansa normaalisti. Tämän seurauksena tietyillä taajuuksilla valo saapuu perille himmeämpänä, kuin se on lähtenyt lähteestä. [14.] Jotta värähtely absorboi infrapunaa, on muutoksia tapahduttava molekyylin pysyvässä dipolimomentissa. Kaksiatomisissa symmetrisissä molekyyliissä, esimerkiksi happimolekyyliissä O<sub>2</sub> ja typpimolekyyliissä N<sub>2</sub>, on vain yksi sidos eikä pysyvää dipolimomenttia, joten ne eivät ole havaittavissa NDIR-teknologialla. [14; 15.] Hiilidioksidi ei perustilassaan ole dipoli, mutta osa värähtelyistä johtaa rakenteeseen, jossa hiilidioksidi muuttuu dipolin kaltaiseen tilaan. [16.]

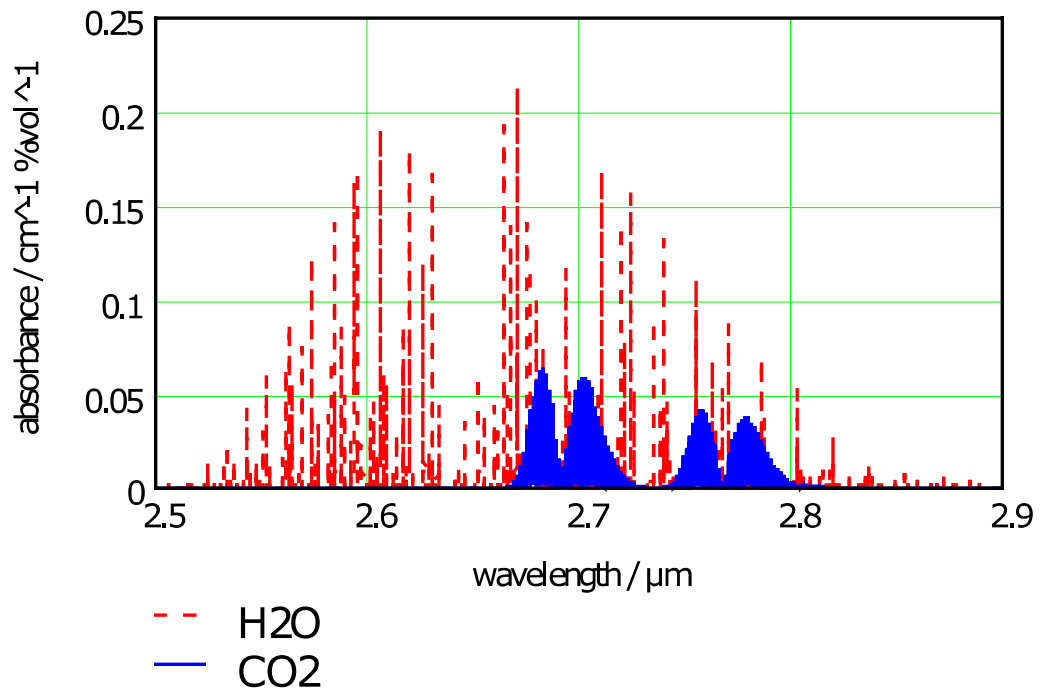
C=O-kaistan venymiseen liittyvä absorptio (esim. hiilidioksidissa ja hiilimonoksidissa) on tyypillisesti hyvin vahvaa, sillä dipolissa tapahtuvat muutokset ovat suuria. [17.] Koska kunkin kaasun molekyyllitasolla tapahtuva värähtely on erilaista ja absorboi valoa eri tavalla, voidaan tämän avulla tunnistaa molekyylejä. [14; 18.]

Kuva 1 esittää eri kaasujen absorptiopiikkejä eri aallonpituuksilla. Hiilidioksidin isoin piikki sijaitsee aallonpituudella 4,26  $\mu\text{m}$ , jota käytetään useissa NDIR-antureissa [19; 20]. Tällä aallonpituudella tapahtuu myös hyvin vähän hiilidioksidimittausta häiritsevää muiden kaasujen absorptiota [14; 21]. Hiilidioksidi absorboi 4,26  $\mu\text{m}$ :n aallonpituuden lisäksi infrapunaa muuallakin, esimerkiksi 2,7  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella [23].



Kuva 1. Teollisuudessa usein käytettyjen kaasujen absorptiospektrejä [22].

Muilla aallonpituuksilla tapahtuu kuitenkin muiden kaasujen aiheuttaman absorptio vuoksi enemmän häiriötä. 2,7  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella häiriötekijänä on vesi (kuva 2) [23]. Mittareiden toimintaperiaatteena on lähettää infrapunalähteestä säteilyä hiilidioksidipitoisuuden läpi ilmaisimelle. Optisen matkan läpi kulkiessaan säteilyä absorboituu, ja säteily saapuu ilmaisimelle heikenneenä. Heikkenemisen määrästä voidaan päätellä matkalla olleen hiilidioksidin määrä. [24.]



Kuva 2. Veden ja hiilidioksidin absorptio 2,7  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella [23].

Kemiallisiin antureihin verrattuna optiset mittalaitteet ovat tyypillisesti isompia, kalliimpia ja vasteajaltaan huonompia, mutta tarjoavat huomattavasti parempaa mittaustarkkuutta, herkkyyttä pienissäkin pitoisuuksissa ja pidempää elinikää, minkä takia ne ovat laaja-alaisessa käytössä [25]. Taulukko 1 tiivistää kemiallisten ja optisten anturityyppien olennaisia eroja.

Taulukko 1. Kemiallisten ja optisten hiilidioksidiantureiden erot [25].

	Kemiallinen	Optinen
Toimintaperiaate	Hiilidioksidia adsorboitaessa kemiallinen vuorovaikutus luo sähköisen signaalin	Hiilidioksidin absorptiota mitataan sopivalla valon aallonpituudella. Absorboimatta jäänyt valo aiheuttaa sähköisen signaalin.
Tyyppi	Elektrokemiallinen, kiinteä elektrolyytti, katalyyttinen palaminen, puolijohde	NDIR, opto-akustinen
Hyvää	Edullisuus, pieni koko, nopea vasteaika	Tarkkuus, herkkyys, elinikä
Huonoa	Tarkkuus, herkkyys, elinikä	Korkea hinta, hankala toteuttaa pieneksi, pidempi vasteaika

### 2.4.1 NDIR-anturit

NDIR-anturit koostuvat neljästä pääkomponentista: infrapunalähteestä, optisesta suodattimesta, kaasukyvetistä ja ilmaisimesta. Infrapunalähtetin lähettää säteen sen aallonpituuden säätävän optisen suodattimen läpi. Valo kulkee kaasukyvetin läpi ilmaisimelle, joka vastaanottaa signaalin ja tulkitsee sen. Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaisen NDIR-rakenteen toimintaperiaate.

Infrapunalähteenä voi toimia mikä vain valonlähde, joka luo tarpeeksi säteilyä halutulla aallonpituudella. Esimerkiksi tavallinen valkohehkuinen lamppu toimii valonlähteenä useissa antureissa. On kuitenkin muitakin tapoja tuottaa infrapunasäde, kuten varta vasten suunnitellut hehkulangat tai elektronisesti tuotetut lähteet. [14.] Valoa voidaan joutua myös pilkkomaan tai moduloimaan, jotta taustasignaali saadaan erotettua halutusta signaalista [26].

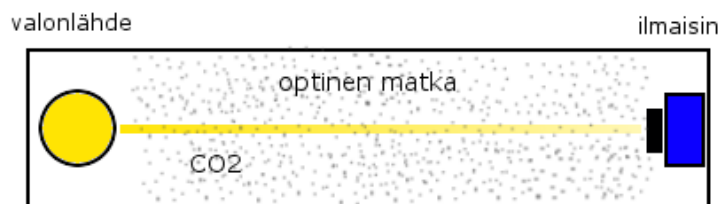
Valosta erotetaan tarpeelliset aallonpituudet suodattamalla dispersiivisesti tai ei-dispersiivisesti. Dispersiivinen anturityyppi käyttää hilarakennetta tai prismaa levittääkseen valon spektrin. Ei-dispersiivisessä anturityypissä puolestaan suodatetaan halutut aallonpituudet optisilla kaistanpäästösuodattimilla. NDIR-antureissa nimensä mukaisesti käytetään jälkimmäistä tapaa. [14.]

Kaasukyvetti on tila, jonka sisällä mitattava kaasu on. Tämän tilan läpi kulkiessaan valo absorboituu. Kaasukyvetti voi olla esimerkiksi putki, joka on jollain tavalla rei'itetty kaasun vaihtumisen mahdollistamiseksi. Valonlähde ja infrapunailmaisin sijaitsevat tyypillisesti putken vastakkaisissa päädyissä. Kyvetin pituus vaikuttaa tapahtuneen absorptioon määrään. Koska kyvetin pinta on suorassa kosketuksessa kaasun kanssa, se tulee valmistaa oikeista materiaaleista, jotta tuotteen stabiilisuus ja luotettavuus saadaan hyvälle tasolle. [14.]

Ilmaisin muuttaa elektromagneettisen säteilyenergian tai lämpötilan muutoksen sähköiseksi signaaliksi. Ilmaisimia on monenlaisia. Termoelektriset ilmaisimet muuttavat lämpötilan sähköiseksi signaaliksi. Termopari (*thermocouple*) käyttää hyväkseen kahden eri metallin risteyspisteessä syntyvää jännitepotentiaalia, joka on suoraan riippuvainen lämpötilasta. Sama voidaan toteuttaa useammalla risteyskohdalla parantaen herkkyyttä. Tätä kutsutaan *thermopileksi*. Termistoribolometri puolestaan muuttaa resistanssiaan ollessaan kosketuksissa infrapunasäteilyn kanssa. Pyroelektrinen ilmaisim käyttää

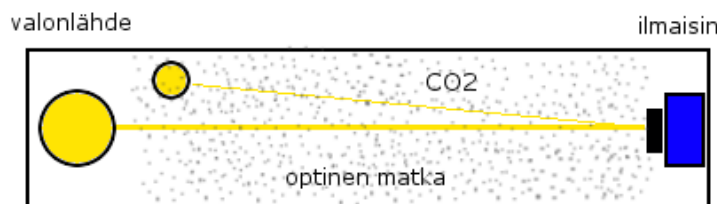
pyroelektrisiä materiaaleja, kuten litiumtantalaattia, jotka polarisoituvat lämpötilan muutoksen myötä. On myös fotoneihin ja fotoakustisuuteen perustuvia menetelmiä. [14.]

NDIR-antureita toteutetaan tyypillisesti kolmella eri tavalla. Yksi vaihtoehto on yhden valonlähteen, yhden aallonpituuden anturi (kuva 3), jossa optisen matkan läpi ilmaisimelle kulkee valoa yhdestä lähteestä. Tässä teknologiassa suurin haaste on ajan yli tapahtuva mittalukeman ajalehtiminen, joka voi johtua valonlähteen pikkuhiljaa tapahtuvasta heikkenemisestä ja mahdollisesta optiselle matkalle kerääntyvästä liasta. [27.] Valmistajat useimmiten ratkaisevat ongelman automaattisella taustakalibroinnilla. Siinä anturi tallentaa jonkin saavutetun hiilidioksidipitoisuuden valitulla aikavälillä ja kalibroi itsensä olettaen, että kyseessä oleva pitoisuus vastaa jotakin tunnettua pitoisuutta, esimerkiksi raikkaan ulkoilman tasoa 350–450 ppmCO<sub>2</sub>. Taustakalibroinnin käyttö soveltuu vain sovelluksiin, joissa jokin saavutettu CO<sub>2</sub>-pitoisuus on tiedossa. Taustakalibrointia ei voida käyttää sovelluksissa, joissa hiilidioksidin määrä ei ole missään vaiheessa ennakoitavissa. [28.]



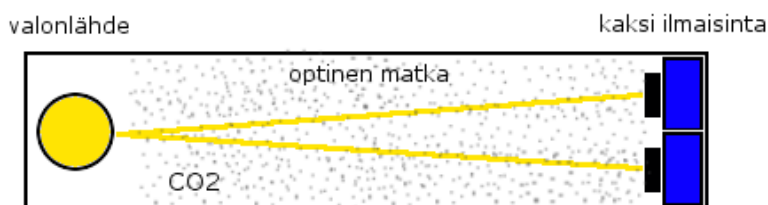
Kuva 3. Yhden valonlähteen ja yhden aallonpituuden anturin mekaniikka.

Käytössä on myös kahden valonlähteen, yhden aallonpituuden anturi (kuva 4), jossa optisen matkan läpi ohjataan kaksi sädetä. Niissä on käytössä valonlähteen lisäksi toinen valonlähde kompensoimaan varsinaisessa lähteessä tapahtuvia muutoksia. Toista valonlähdetä vilkutetaan harvoin, joten se ei vanhene. Ylimääräisen valonlähteen lisääminen kuitenkin monimutkaistaa rakennetta ja kasvattaa valmistuskustannuksia. Ylimääräinen valonlähde voi myös aiheuttaa ongelmia laitteen itselämpöävyiden kanssa. Kahden valonlähteen, yhden aallonpituuden anturi ratkaisee valonlähteen muutoksista aiheutuvia ongelmia, mutta ei kuitenkaan pysty kompensoimaan epätasaisesti optiselle matkalle kertynyttä pölyä ja roskaa. [27.]



Kuva 4. Kahden valonlähteen ja yhden aallonpituuden anturin mekaniikka.

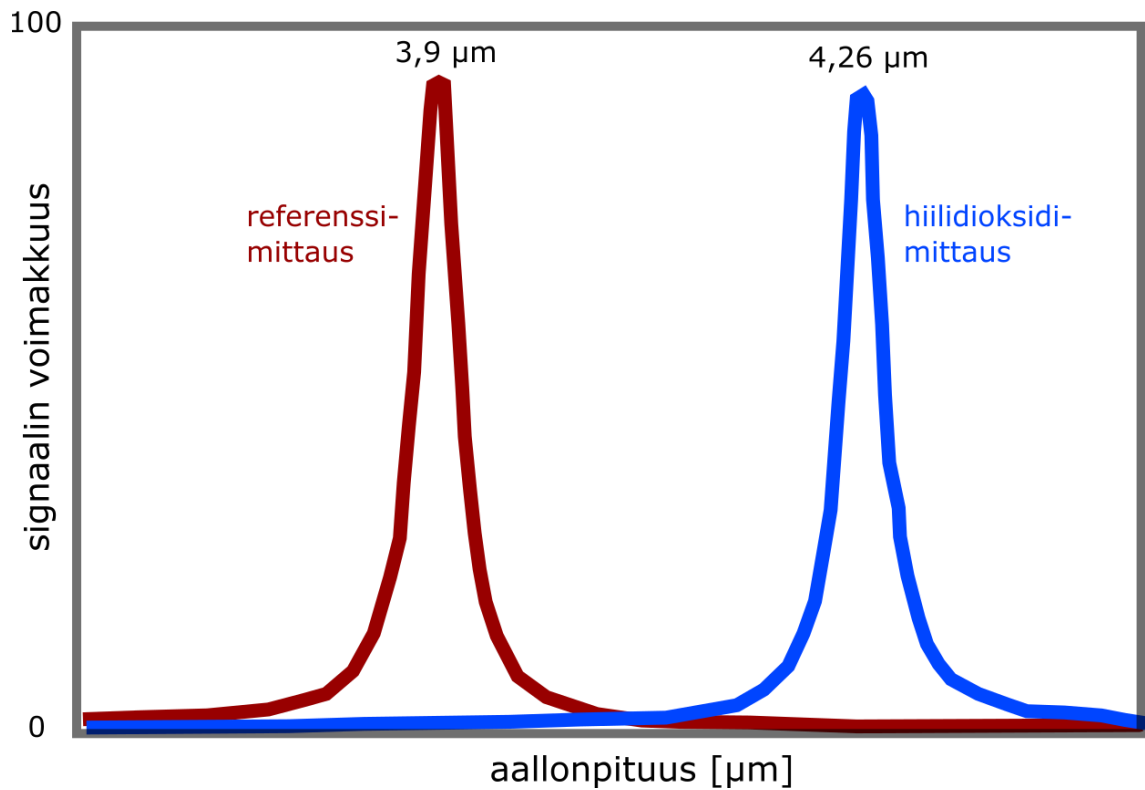
Kolmas ratkaisu on yhden valonlähteen, kahden aallonpituuden anturi (kuva 5). Tässä ratkaisussa käytetään kahta ilmaisinta, joista toinen on viritetty hiilidioksidin absorptioaallonpituudelle ja toinen referenssiaallonpituudelle, jossa absorptiota ei tapahdu (kuva 6). Referenssimittauksen käyttäminen eliminoi valonlähteen intensiteetin ajan yli tapahtuvan vaihtelun, sillä havaittua absorptiota verrataan aina referenssimittauksesta saatuun lukemaan. Koska referenssi- ja absorptiomittauksen säteet ovat kulkeneet eri matkan, tämäkään järjestelmä ei kykene kompensoimaan optisen matkan epätasaista liikaantumista. [27.] Ylimääräinen ilmaisimien myös monimutkaistaa rakennetta ja tekee siitä huomattavasti alttiimman ilmaisimissa tapahtuville muutoksille.



Kuva 5. Yhden valonlähteen ja kahden aallonpituuden anturin mekaniikka toteutettuna kahdella ilmaisimella.

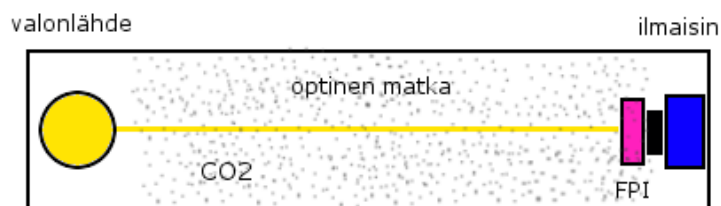
Näiden kolmen peruseriaatteen lisäksi on kuitenkin muitakin tapoja toteuttaa NDIR-anturi. Mittalaittevalmistaja Vaisala Oyj käyttää CARBOCAP®-anturissaan erilaista yhden valonlähteen ja kahden aallonpituuden anturia. Tämän anturityypin toiminta perustuu yhden ilmaisimen eteen laitettavaan Fabry–Pérot'n interferometriin (FPI), jossa voidaan sähköisesti säätämällä valita läpi päästettävät aallonpituudet (kuva 7). Normaalin absorptioaallonpituuden (tyypillisesti n.  $4,2 \mu\text{m}$ ) lisäksi mitataan referenssimittaus aallonpituudella, jossa absorptiota ei tapahdu (esim.  $3,9 \mu\text{m}$ ), ja näiden kahden lukeman suhteesta lasketaan hiilidioksidipitoisuus [19; 24].





Kuva 6. Kahden aallonpituuden anturissa mitataan hiilidioksidin absorptioaallonpituuden lisäksi myös referenssimittaus aallonpituudelta, jossa absorptiota ei tapahdu.

Varsinaisen mittauksen vertaaminen referenssimittaukseen eliminoi valtaosan mittalukeman ajalehtimisestä, jota tapahtuu aiemmin mainituissa anturityypeissä: valonlähteen heikkenemisen aiheuttaman ajalehtimisen ja epätasaisesti kertyvän lian aiheuttaman mittausvirheen. Näiden tekijöiden eliminoiminen parantaa FPI:llä varustetun yhden valonlähteen, kahden aallonpituuden anturin stabiilisuutta ja pienentää ylläpitovaatimuksia. [27.]



Kuva 7. Yhden valonlähteen ja kahden aallonpituuden anturin mekaniikka toteutettuna Fabry-Pérot'n interferometrillä.

### 2.4.2 Fabry–Pérot’n interferometri

Fabry–Pérot’n interferometri on laite, jolla voidaan hallita ja mitata valon aallonpituuksia. Laitteessa valo ohjataan kahden osittain heijastavan pinnan väliin. Pinnat heijastavat valoa välillään päästään aina hieman valoa lävitsensä, minkä seurauksena saadaan useita valonsäteitä. Näiden säteiden interferenssin tuloksena saadaan aallonpituus, joka on riippuvainen pintojen etäisyydestä toisiinsa. [29.]

Nykyään Fabry–Pérot’n interferometreistä pystytään tekemään todella pieniä MEMS-teknologialla (*Micro-electromechanical system*, suom. mikroelektromekaaninen järjestelmä), jossa yhdistellään mikrometriluokassa sähköisiä ja elektronisia komponentteja. Näiden pienten mikroelektromekaanisten interferometriä käytetään on mahdollista kaasujen mittauksessa, sillä ne ovat todella pienikokoisia ja edullisia valmistaa suurissa määrin. [29.] Hiilidioksidimittalaitesovelluksissa FPI:n pintojen etäisyyttä sähköisesti säätämällä saadaan tehokkaasti mitattua absorptiota usealla aallonpituudella, mikä mahdollistaa yhden säteen, kahden aallonpituuden anturin toteuttamisen.

### 2.4.3 Ideaalikaasulaki

Ideaalikaasu on puhtaasti teoreettinen kaasu, joka koostuu keskenään identtisistä partikkeleista, jotka ovat kooltaan mitättömiä ja joiden välillä ei esiinny merkittäviä molekyylien välisiä voimia. Kaasut eivät käyttäydy todellisuudessa täysin ideaalikaasujen tavoin, mutta ideaalikaasulakia sovelletaan usein kuvaamaan oikeiden kaasujen käyttäytymistä. [24.] Ideaalikaasulaki määrittelee paineen ja lämpötilan vaikutuksen ideaalikaasun pitoisuuteen. [24; 30; 31.]

$$pV = nRT \quad (1)$$

p on kaasun paine [Pa]

V on kaasun tilavuus [ $m^3$ ]

n on kaasun ainemäärä [mol]

R on yleinen kaasuvakio ( $8,31446 \frac{J}{mol K}$ )

T on kaasun lämpötila [K]

Yllä olevaan kaasujen yleiseen tilanyhtälöön (1) voidaan käyttää Boltzmannin vakion ja Avogadron vakion yhteyttä (2) ja ainemäärän yhtälöä (3) sen saattamiseen yhtälön 4 muotoon.

$$k = \frac{R}{N_A} \Leftrightarrow R = kN_A \quad (2)$$

$N_A$  on Avogadron vakio ( $6,022141 \times 10^{23} mol^{-1}$ )

k on Boltzmannin vakio ( $1,38065 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ )

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (3)$$

N on kaasumolekyylien lukumäärä

$$pV = NkT \Leftrightarrow \frac{N}{V} = \frac{p}{kT} \quad (4)$$

Kaavasta 4 voidaan havaita, että kaasumolekyylien lukumäärän pysyessä vakiona sen tilavuus riippuu paineesta ja lämpötilasta. Koska optisesti havainnoidaan kaasun molekyylitiheyttä ( $\frac{N}{V}$ ), joka muuttuu lämpötilan ja paineen mukaan, on mittalaitteen tarpeellista kyetä kompensoimaan lämpötilan ja paineen aiheuttamien muutosten vaikutus havaittuun tiheyteen [24].

Ideaalikaasulakia hyödyntämällä voidaan laskea kaasun molekyylitiheys olosuhteessa kun tunnetaan kaasun tiheys SATP-olosuhteessa 1013,25 hPa, 25 °C [32] (*Standard Ambient Temperature and Pressure*). Kun kaasun yleiseen sijanyhtälöön sijoitetaan kaasun ainemäärän tilalle  $\rho \frac{V}{M}$  ja oletetaan kaasun moolimassan olevan sama mole-

missä olosuhteissa, voidaan yhtälö saattaa yhtälön 5 muotoon, josta voidaan laskea pitoisuus lämpötila- ja painekorjattuna. [24.]

$$\rho(T, p) = \rho(25\text{ }^{\circ}\text{C}, 1013\text{ hPa}) \times \frac{p}{1013} \times \frac{298}{273+T} \quad (5)$$

$p$  on kaasun pitoisuus [ppm tai %]

$p$  on ilmanpaine [hPa]

$t$  on ilman lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Taulukkoon 2 on laskettu esimerkkinä lämpötilan ja paineen vaikutusta 1000 ppm:n hiilidioksidipitoisuuteen.

Taulukko 2. Ideaalikaasulain (1) perusteella laskettu taulukko lämpötilan ja paineen vaikutuksesta havaittuun hiilidioksidipitoisuuteen pitoisuuden ollessa 1000 ppm.

		Lämpötila [°C]								
		-10	0	10	20	25	30	40	50	60
Paine [hPa]	800	895	862	832	803	790	777	752	729	707
	900	1007	970	936	904	888	874	846	820	795
	1000	1119	1078	1039	1004	987	971	940	911	883
	1013	1133	1092	1053	1017	1000	983	952	923	895
	1100	1230	1185	1143	1104	1086	1068	1034	1002	972
	1200	1342	1293	1247	1205	1185	1165	1128	1093	1060
	1300	1454	1401	1351	1305	1283	1262	1222	1184	1148

Mittalaittevalmistajat usein antavat käyttäjien ilmoittaa laitteelle ympäristön lämpötila- ja painearvot niin, että mittalaite osaa niiden perusteella laskea todellisen hiilidioksidin määrän. Arvot voi laitteille joko syöttää manuaalisesti tai ulkoisella mittalaitteella osana monimutkaisempaa mittausjärjestelmää. Joissain laitteissa on nykypäivänä oma lämpötilamittaus, jolla laite osaa itse kompensoida lämpötilan vaihtelusta aiheutuvan virheen [33].

#### 2.4.4 Laitteiden sisäinen laskenta

Infrapunailmaisimelta saadaan sähköinen signaali. Signaalille tehdään useita toimenpiteitä, ennen kuin laitteen näytölle tai ulostuloon annetaan näyttämä. Kahden aallonpituuden antureissa käytetään referenssi- ja absorptiosignaaleita pitoisuuden laskentaan. Kun absorptiosignaalin suuruus jaetaan referenssisignaalin suuruudella, saadaan mit-

tauksessa hiilidioksidin aiheuttaman absorption suuruus selville. Absorption suuruus ei suoraan kerro hiilidioksidipitoisuutta, vaan se on muutettava pitoisuudeksi. Pitoisuus on riippuvainen muun muassa optisen matkan pituudesta, ilmanpaineesta ja lämpötilasta, joten laitteen sisällä on oltava algoritmeja, joiden avulla päästään todelliseen näyttämään.

Hiilidioksidimittalaitteet kalibroidaan tuotannossa näyttämään oikeata pitoisuutta tunnettuja pullopitoisuuksia vasten. Kalibrointi tehdään valitussa määrässä pisteitä siten, että kalibroitava laite laitetaan tunnettuun pitoisuuteen. Pitoisuudessa asetetaan tapahtuneen absorption arvolle sitä vastaava hiilidioksidipitoisuus. Valituissa pisteissä kalibroinnin lisäksi laitteille on laskettu niiden käyttäytymistä kuvaava anturimalli, joka kuvaa sitä, miten laitteen näyttämä käyttäytyy kalibrointipisteiden välillä. Anturimallin laatu voi pitkälti määrätä, kuinka hyvin laitteen näyttämä on kohdallaan pitoisuuksissa, joissa laitetta ei ole kalibroitu. Anturimallin lisäksi laitteille on tapana tehdä paine- ja lämpötilamallit, joiden mukaan laite kompensoi lukemansa, jos paine ja lämpötila tunnetaan. Painemalli luodaan tarkastelemalla laitteen käyttäytymistä erilaisissa paineolosuhteissa ja luomalla datan perusteella korjausalgoritmi. Lämpötilamallin luonnissa tarkastellaan laitteen käyttäytymistä eri lämpötiloissa ja luodaan korjausalgoritmi siltä pohjalta.

Anturin epälineaarisen käyttäytymisen, paineriippuvuuden ja lämpötilariippuvuuden lisäksi on otettava huomioon signaalin kohina, joka huomiotta jätettäessä voi aiheuttaa suuriakin virheitä näyttämässä. Tämän takia signaaleja suodatetaan, ennen kuin ne saatetaan käyttäjän tietoon. Alipäästösuotimella voidaan poistaa esimerkiksi äkillisten paineiskujen aiheuttamien piikkien aiheuttama häiriö näyttämään. Tämän lisäksi voidaan reaaliaikaisen mittaustulosten näyttämisen sijaan esimerkiksi tarkkailla juoksevaa keskiarvoa useasta edellisestä suoritetusta mittauksesta. Keskiarvoistamisella on kuitenkin myös haittansa, sillä vanhojen lukemien käyttäminen laskutoimituksessa hidastaa vasteaikaa. Kohdesovelluksesta riippuen tulee valmistajan miettiä, ollaanko valmiita hidastamaan laitteen vasteaikaa näyttämän kohinan vähentämiseksi ja mittauskyvyn parantamiseksi.

Useat mittalaittevalmistajat valmistavat samasta anturista laitteita monelle eri mittausalueelle. Samasta anturista voidaan esimerkiksi tehdä 0...2 000, 0...5 000 ja 0...10 000 ppmCO<sub>2</sub> -mittausalueen laitteita. Koska anturilta saadut signaalit ovat anturin rakenteella kuitenkin samat, tulee valmistajan skaalata analoginen ulostulo oikealle välille. Tämä aiheuttaa antureissa leikkurikäytöstä mitta-alueen rajalla. Esimerkiksi kun

ylärajan 5000 ppmCO<sub>2</sub>:ssa saatu signaali skaalataan 10 V:n ulostuloksi, saadaan kyllä yli 5000 ppm:n pitoisuuksilla laitteesta 10 V. Koska negatiiviset ppm-lukemat ovat järjettömiä, rajoittavat mittalaittevalmistajat 0 ppmCO<sub>2</sub>:ssa lukeman niin, että mikäli laskennassa saadaan negatiivinen näyttämä, antaa laite kuitenkin ulos 0 ppmCO<sub>2</sub>:a vastaavan signaalin.

### 3 Hiilidioksidimittalaitteet

#### 3.1 Hiilidioksidimittalaitteiden ominaisuudet

##### 3.1.1 Mittausalue

Hiilidioksidin aiheuttamaa absorptiota mitattaessa on mittauskyky rajattava jollain tavalla halutulle alueelle. Tämä johtuu absorption epälineaarisesta käyttäytymisestä, jonka takia herkkyys saturoituu, kun lähestytään korkeaa absorptiota. Näin ollen matalampia hiilidioksidipitoisuuksia mitattaessa käytetään pidempää optiikkaa, joka tuo optiselle matkalle suuremman määrän hiilidioksidimolekyylejä, mutta lasketaan mittausalueen ylärajaa. Vastaavasti korkeita pitoisuuksia mitattaessa pysytään lyhyemmässä optisessa matkassa, mutta asetetaan mittausalueen raja korkeammalle.

Tyypillisiä ovat alueiden 0...2 000 ppm, 0...5 000 ppm, 0...1 %, 0...5 % ja 0...20 %CO<sub>2</sub> mittalaitteet. Koska mittalaitteen mittauskyky riippuu merkittävästi siitä, mille alueelle mittalaite on optimoitu, kannattaa asiakkaan aina harkita, kuinka korkeaa pitoisuutta sovelluksessa on tarpeen mitata.

##### 3.1.2 Mittaustarkkuus

Mittaustarkkuudella tarkoitetaan, kuinka hyvin laite kykenee havaitsemaan ja näyttämään todellista hiilidioksidipitoisuutta. Tähän vaikuttaa optisen matkan pituuden ja mittausalueen rajaamisen lisäksi muitakin tekijöitä. Valonlähteeltä optisen matkan läpi ilmaisimelle saadun signaalin määrä vaikuttaa mittauskykyyn merkittävästi. Signaalia voidaan parantaa monin keinoin. Valonlähteen valinnalla ja säätämällä voidaan vaikuttaa lähtevään valonsäteeseen huomattavasti. Myös optisen matkan muodolla on merkityksensä: koska infrapunälähteestä on hankala tuottaa säde vain yhteen suun-

taan, voidaan esimerkiksi portaittain suippoontuvalla heijastuspinnalla ohjata säteitä ilmaisimelle [25]. Vahvempi signaali kohisee vähemmän ja parantaa mittaustarkkuutta.

Mittauksessa tapahtuva kohina ja muut häiriöt voivat usein isoine piikkeineen heikentää mittaustarkkuutta. Näiden häiriöpiikkien vaikutusta mittaukseen voidaan vähentää suodatuksella eli esimerkiksi jättämällä liian suuret hetkelliset muutokset huomioimatta. Lisäksi mittaustarkkuuteen voivat vaikuttaa muun muassa laitteen tai sen osien lämpenemisen aiheuttamat muutokset havaittuun hiilidioksidipitoisuuteen, optisella matkalla hajasäteiden heijastukset ja niiden arviointi tai sen puute, linearisointi sekä mekaniikan ja elektroniikkaan valittujen komponenttien laatu.

Mittaustarkkuus esitetään tuotteen määrittelyssä tyypillisesti yhdellä tai kahdella komponentilla seuraavista: vakiopoikkeama (esim.  $\pm 40 \text{ ppmCO}_2$ ), suhteellinen poikkeama (esim.  $\pm 2 \%$  lukemasta) ja poikkeaman osuus koko mittausalueesta (esim.  $\pm 3 \%$  mittausalueesta). Esimerkiksi SenseCube KCD-HP100A -mittalaitteen (mittausalue  $0 \dots 10\,000 \text{ ppmCO}_2$ ) datalehdessä esiintyvä tarkkuusmäärittely (kaava 6) [41] on tulkittavissa seuraavasti pitoisuudessa  $2\,000 \text{ ppmCO}_2$ :

$$\pm(3\%F.S + 2\%Reading) \quad (6)$$

$F.S$  (*Full Scale*) = laitteen mittausalueen yläraja =  $10\,000 \text{ ppmCO}_2$

$Reading$  = lukema =  $2\,000 \text{ ppmCO}_2$

$$= \pm(0,03 * 10000 + 0,02 * 2000)\text{ppmCO}_2 = \pm 340 \text{ ppmCO}_2$$

Tämä tarkoittaa, että mittalaite saa laitemäärittysten mukaan näyttää  $2\,000 \text{ ppm}$ :n  $\text{CO}_2$ -pitoisuudessa  $340 \text{ ppm}$  liian paljon tai vähän, eli  $1660\text{--}2340 \text{ ppmCO}_2$ .

Mittaustarkkuuden merkitys riippuu sovelluksesta. Sellaisissa sovelluksissa kuin karjan kasvattamojen ilman laadun tarkkailussa suurpiirteinen pitoisuus riittää, kun taas äärimmäisen herkissä prosesseissa pienetkin virheet hiilidioksiditason arvioinnissa voivat olla kohtalokkaita.

### 3.1.3 Kohina

Yksi havaittuun mittaustarkkuuteen vaikuttava tekijä on kohina. Vaikka keskimäärin laite näyttäisikin oikein, laitteen näyttämän heiluessa todellisen lukeman ympärillä voi lukemaa tarkkaileva ihminen tai järjestelmä tulkita pitoisuuden olevan jotain muuta, kuin mitä se todellisuudessa on. Kohinaa voidaan pienentää mittalaitteen ohjelmistossa tapahtuvalla keskiarvoistuksella ja muulla suodatuksella. Tämä kuitenkin pidentää laitteen vasteaikaa. Kohinaa ei tyypillisesti ilmoiteta laitteiden datalehdissä, mutta se voi vaikuttaa merkittävästi asiakkaan käyttökokemukseen ja sovelluksesta riippuen käytettävyyteen.

### 3.1.4 Vasteaika

Hiilidioksidimittalaitteet eivät vastaa ympäristön pitoisuuden muutoksiin välittömästi, sillä hiilidioksidilla kestää aikansa päästä anturin optiselle matkalle, jossa sitä mitataan. Lisäksi tähän reaktioaikaan voi tuoda oman lisänsä keskiarvoistus ja muu suodatus, jonka takia lukemalla kestää entistä pidempään tasoittua uudelle tasolle. Suuressa roolissa on laitteen mekaniikka, joka hyvin suunnittelemalla voidaan kaasua saada nopeasti anturin sisälle diffuusiolla. Lyhyt ja esteetön matka anturille on vasteajan kannalta paras. Erityisesti ilmastointikanaviin suunniteltavissa mittalaitteissa voidaan käyttää hyväksi ilmastointikanavassa tapahtuvaa ilmavirtausta, joka ohjataan laitteen läpi optisen matkan kautta. Mittalaitteessa voi myös olla sisäinen tuuletin kiihdyttämässä kaasun vaihtoa. Kaasun vaihtumista voi hidastaa laitteen pölyntyntymistä ja veden aiheuttamia vahinkoja vastaan tarkoitettu membraani, jonka läpi kaasua kulkee anturille.

Vasteaikaa merkitään hiilidioksidimittalaitteiden datalehtien määritelmässä tyypillisesti T63- tai T90-lukuarvolla, joka kuvaa kuinka kauan laitteella kestää saavuttaa 63 % tai 90 % tapahtuneesta muutoksesta, ja yksiköinä toimivat useimmiten sekunnit tai minuutit. Anturista, mekaniikasta ja laitteen älystä riippuen vasteaika voi olla kymmenistä sekunneista minuutteihin.

Vasteaika on tärkeä ominaisuus sovelluksissa, joissa on tärkeää reagoida nopeasti hiilidioksiditason muutoksiin tai joissa hiilidioksidin säätäminen on jatkuvaa. Ilman laadun tarkkailussa tai kasvihuoneissa eivät suuret hiilidioksidipiikit ole suuri huolen aihe. Esimerkiksi soluviljelyssä puolestaan tarkkaillaan ja säädetään jatkuvasti kammion



hiilidioksidipitoisuutta mitatun pitoisuuden perusteella, joten siinä matala vasteaika on tärkeä, jotta säätäminen toimii mahdollisimman hyvin ja pitoisuus pysyy oikeana.

### 3.1.5 Lämpötila- ja paineriippuvuus

Koska kaasun lämpötila ja paine vaikuttavat olennaisesti havaittuun hiilidioksidipitoisuuteen [30], on mittalaitteen tärkeää osata kompensoida niiden vaikutus pois näytämästään. Tämä voi tarkoittaa, että mittalaite käyttää joko itse mittaamiaan tai muualta automaattisesti tai käsin syötettyjä lämpötila- ja painearvoja ja laskee niitä hyväksi käyttäen todellisen lukeman. Mikäli mittalaitevalmistaja tietää laitteensa käyttäytyvän tietyllä tavalla tietyissä olosuhteissa, se voi huomioida laitteen sisäisessä laskennassa nämä seikat. Vaihtoehtoisesti kompensointi voidaan antaa asiakkaalle, jonka tehtäväksi jää laskea mittalaitteesta saamastaan hiilidioksidilukemasta ja itse tietämistään lämpötila- ja painearvoista todellinen pitoisuus. Asiakas ei kuitenkaan tyypillisesti ole tietoinen mittalaitteen tarkemmasta käyttäytymisestä, ja tällä vaihtoehdolla ei päästä yhtä tarkkaan lämpötila- ja painekompensointiin. Lämpötilan ja paineen lisäksi voidaan näytämästä kompensoida myös muun muassa hapen tai kosteuden vaikutuksia [33].

Mittalaitevalmistaja voi datalehdessään määritellä, kuinka paljon lämpötilan ja paineen erot vaikuttavat mittaustarkkuuteen. Vaikutus tyypillisesti ilmaistaan vakiopoikkeamana per lämpötila-aste ( $\text{ppm CO}_2 / ^\circ\text{C}$ ) tai osuutena näytämästä per lämpötila-aste ( $\% \text{ of Reading} / ^\circ\text{C}$ ).

Asiakkaan tulee laitetta hankkiessaan miettiä ympäristöä, jossa laitetta tullaan käyttämään. Mikäli laitetta käytetään lähellä normaalia olosuhdetta,  $25\text{ }^\circ\text{C}$  ja  $1013\text{ hPa}$ , ei lämpötila- ja paineriippuvuudella ole suurta merkitystä. Kuitenkin erityisesti jos laitetta aiotaan käyttää suuressa matala- tai korkeapaineessa, on laitteen paineriippuvuus yksi tärkeimmistä mittaustarkkuuteen vaikuttavista seikoista. Vastaavasti jos laitetta aiotaan käyttää korkeassa tai matalassa lämpötilassa, on lämpötilariippuvuus tärkeä ottaa huomioon.

### 3.1.6 Toimintaolosuhteet

Tyypillisesti hiilidioksidimittalaitteen toimintaolosuhteet on jollain tavalla rajattu toiminnalliseen lämpötila-alueeseen, paine-alueeseen ja suhteelliseen kosteuteen. Esimer-

kiksi mittalaitevalmistaja E+E:n 870-mittapään toiminnallinen alue on -40–60 °C, 85–110 kPa ja 0–100 %RH [34].

Infrapunailmaisoin muuttaa elektromagneettisesta säteilyenergiasta tai lämpötilan muutoksista sähköisiä signaaleja. Koska niiden toiminta on lämpötilariippuvaista, ne rajoittavat mittauksen lämpötila-alueetta. Hyvin suunniteltuna niitä kuitenkin voidaan käyttää -40–60 °C:n lämpötila-alueella ilman suurempia ambientin lämpötilan vaihteluista aiheutuvia häiriöitä. Yleensä ilmaisinta pidetään hieman ympäröivän lämpötilan yläpuolella kondensoitumisen estämiseksi, sillä vesihöyryn kondensoituminen optiikassa tai ilmaisimella voi merkittävästi huonontaa laitteen suorituskykyä. [14.]

Normaalia ilman kosteusvaihtelua laitteet usein kestävätkin hyvin. Korkeat suhteelliset kosteudet voivat kuitenkin aiheuttaa korroosiota ja kontaminoitumista (ja mikäli laitetta ei lämmitetä millään tavalla, kondensoitumista), jotka puolestaan voivat johtaa mittalaitteen rikkoutumiseen. [14.]

NDIR-tekniikalla hiilidioksidin mittaukseen eniten vaikuttaa paine, jonka vaikutuksen täysi kompensointi pois lukemasta on mahdotonta. Mittalaitteet ovat useimmiten sen verran kestäviä, ettei paine vahingoita niitä, mutta paineen vaikutus näyttämään ja sen hankala kompensointi pakottaa mittalaitevalmistajat rajaamaan toiminnallista aluettaan.

Lämpötila- ja paineriippuvuuksien lisäksi pitää laitetta hankkiessa ottaa huomioon myös sen toimintaolosuhteen rajat. Kaikki mittalaitteet eivät esimerkiksi ole toimintakykyisiä kovissa pakkasolosuhteissa. Esimerkiksi kuivajään valmistuksessa on tapeen mittalaite, joka toimii yli -20 °C pakkasessa.

### 3.1.7 Tiiviys ja kestävyys

Tiiviys on yksi tekijä, joka tulee huomioida laitteen hankinnassa. Se ilmaistaan datalehdessä IP-luokituksena (*Ingress Protection*, suom. ”sisääntunkeutumisen suojaus”). IP-järjestelmän kahden parametrin tasot 0–6 ja 0–8 kuvaavat kuinka hyvin laite on suojattu vierailta esineiltä ja pölyltä sekä vedeltä. Parametrien numeroiden kuvaukset on esitetty taulukoissa 3 ja 4. Testejä suoritetaan standardoitujen testiohjeiden mukaisesti. [35.]

Taulukko 3. IP-luokituksen ensimmäisen numeron tasojen kuvaukset [35].

1. numero	Kuvaus
0	Ei suojausta kappaleilta
1	Suojattu kiinteältä, halkaisijaltaan 50 mm:n kappaleelta
2	Suojattu kiinteältä, halkaisijaltaan 12,5 mm:n kappaleelta
3	Suojattu kiinteältä, halkaisijaltaan 2,5 mm:n kappaleelta
4	Suojattu kiinteältä, halkaisijaltaan 1,0 mm:n kappaleelta
5	Suojattu haitalliselta määrältä pölyä
6	Suojattu pölyltä täysin

Taulukko 4. IP-luokituksen toisen numeron tasojen kuvaukset [35].

2. numero	Kuvaus
0	Ei suojausta nesteeltä
1	Suojattu pystysuoraan tippuvilta vesipisaroilta
2	Suojattu 15°:n kulmassa tippuvilta vesipisaroilta
3	Suojattu korkeintaan 60°:n kulmassa tulevalta sateelta
4	Suojattu joka suunnasta veden suihkutukselta
5	Suojattu joka suunnasta veden roiskaisulta
6	Suojattu joka suunnasta veden voimakkaalta suihkulta
7	Upottamisella veteen tietyksi ajaksi tiettyyn paineeseen ei haittavaikutusta
8	Sama kuin 7, mutta kovemmat vaatimukset keskusteltu asiakkaan ja valmistajan välillä

Laitteista pyritään tekemään mahdollisimman tiiviitä, jottei pöly ja vesi pääse sotkemaan mittauksia. Kaasua päästetään tavanomaisesti optiikkaan membraanin, jota pöly tai vesi eivät läpäise, läpi.

Teollisiin sovelluksiin valmistettavista hiilidioksidimittalaitteista pyritään tekemään aina hyvin suojattuja, sillä olosuhteet ovat lähes poikkeuksetta hyvin vaativia. Kasvihuoneissa ja eläinten kasvattamoissa vettä ja likaa roiskuu, inkubaattoreiden kosteissa olosuhteissa laitteet ovat jatkuvasti vaarassa kondensoitua, ja käytännössä kaikissa prosesseissa laite on jollain tavalla altis likaantumiselle tai pölylle.

Myös laitteen kestävyydellä voi olla merkityksensä. Jos laite on integroitu johonkin monimutkaisempaan järjestelmään, voi käyttäjän edun mukaista olla, ettei sitä poisteta järjestelmästä esimerkiksi sen siivoamisen ajaksi. Osalla käyttäjistä on esimerkiksi tapana pestä inkubaattoreita painepesurilla ja/tai voimakkailla kemikaaleilla, mikä vaatii laitteelta kovien paineiskujen kestoja ja hyvää toleranssia erilaisia kemikaaleja vastaan.

### 3.1.8 Stabiilisuus

Stabiilisuudella tarkoitetaan sitä, kuinka vähän laitteen näyttämä ajelehtii poispäin todellisesta pitoisuudesta ajan myötä. Ajan kuluessa tapahtuvaa ajelehtimistä voivat laitteen toteutustavasta riippuen aiheuttaa muun muassa epäsymmetrinen lian kerääntyminen optiselle matkalle, valonlähteen voimakkuuden himmeneminen ja kaikenlainen muu kuluminen. Koska NDIR-antureissa kaasu ei ole vuorovaikutuksessa kuin valonsäteiden kanssa, ovat antureiden elinajat tyypillisesti pitkiä [14]. Stabiilisuutta ei aina laitteiden datalehdissä ole määritetty, mutta se voidaan ilmoittaa esimerkiksi ajelehtimisen määränä ppm:inä hiilidioksidia vuodessa [36].

Stabiilisuutta on harkittava erityisesti sovelluksissa, joissa laitetta halutaan pitää kiinni järjestelmässä mahdollisimman pitkään ilman ylläpitotoimenpiteitä. Laitteen hyvä stabiilisuus (pieni lukeman ajelehtiminen) mahdollistaa käyttäjälle laitteen koskematta jättämisen pidemmiksi ajoiksi, mikä on hyvä, jos hiilidioksidin mittausta ei saa hetkellisesti kään keskeyttää.

### 3.1.9 Start-up- ja warmup-aika

Mittalaitteen start-up-aika kuvaa sitä, kuinka kauan laitteella kuluu aikaa mittauksen aloittamiseen laitteen nollaamisen jälkeen. Warmup-aika puolestaan kuvaa sitä, kuinka kauan laitteella kuluu aikaa mittauksen aloittamiseen sen jälkeen, kun laite on ollut pitkäaikaisesti poissa sähköistä. Laitteiden määrittelyissä näitä ilmaistaan määrittelyjen mukaisen mittauksen saavuttamiseen kuluvana aikana sekunteina.

Esimerkiksi sähkökatkon tapahtuessa voi laite hetkellisesti sammua ja nollaantua. Nopealla start-up-ajalla laite tokenee nopeasti ja hiilidioksidin mittausta saadaan käyntiin ilman suurempaa seisokkiakaa, kun taas hitaasti tokeneva laitteella jäädään ilman todellista tietoa hiilidioksidipitoisuudesta pidemmäksi ajaksi. Hitaasti tokeneva laite voi olla hyvin haitallinen sovelluksessa, jossa hetkellinen väärä pitoisuus voi aiheuttaa suurta tuhoa.

## 3.2 Akkreditoitu kalibrointi

Laboratorion akkreditoinnilla tarkoitetaan muodollista kolmannen osapuolen tunnustusta laboratorion kyvystä suorittaa testejä ja kalibrointia standardin ISO/IEC 17025 mu-

kaisesti. Akkreditointiprosessissa laboratorion hallinta- ja laatujärjestelmiä sekä laboratorion kykyä suorittaa vaadittuja tehtäviä arvioidaan. Akkreditointi saavutetaan auditoinnissa, jossa asiantuntija varmistaa, että laboratorio täyttää vaatimukset. Auditointeja toistetaan säännöllisesti pitäen huoli, että laatua myös ylläpidetään. Akkreditoidussa laboratoriossa voidaan kalibroida ja testata tuotteita akkreditoidusti. [37.]

Akkreditoitua kalibrointia voidaan vaatia sovelluksissa, joissa on poikkeuksellisen kovat laatustandardit mittalaitteelle. Tämä kolmannen osapuolen tunnustus eroaa laitteen sertifiointista, jossa yritys itse vakuuttaa, että tuote täyttää vaaditut ominaisuudet. Akkreditoidun kalibroinnin vaativa sovellus voi olla esimerkiksi toimiminen referenssimittalaitteena. [38.] Lisäksi akkreditoitua kalibrointia voidaan tarvita viranomaismääräysten täyttämiseen esimerkiksi lääkkeiden valmistuksessa tai turvallisuuden varmistamisessa [39].

Akkreditoidusti kalibroidun tuotteen mukana toimitetaan kalibrointisertifikaatti [40]. Tällä sertifikaatilla yritys takaa, että tuote on kalibroitu standardin mukaisesti ja että sen mitaukset ovat jäljitettävissä kansallisiin tai kansainvälisiin standardeihin [37; 40].

### 3.3 Testattavat laitteet

Insinööriyössä testattavaksi valittiin valikoima hiilidioksidimittalaitteita maineikkailta hiilidioksidin ja muiden kaasujen mittaukseen erikoistuvilta valmistajilta siten, että laitteiden ominaisuudet ja sovellukset vastaavat mahdollisimman paljon toisiaan. Päädyttiin neljän laitteen valintaan:

- Vaisala GMP252
- E+E 870
- SenseCube KCD-HP100A
- E+E 820.

Taulukoissa 5 ja 6 vertaillaan valmistajien tuotteilleen antamia määrytyksiä. Taulukoiden jälkeen laitteet käydään yksityiskohtaisemmin läpi yksitellen.

Taulukko 5. GMP252- ja EE870-mittalaitteiden määrittelyvertailu [34; 36].

	GMP252	EE870
Mittausalue	0...10 000 ppm	0...10 000 ppm
Tarkkuus*	0...3000: $\pm 40$ ppm 3000...10 000: $\pm 2$ %lukemasta	$\pm(100 \text{ ppm} + 5 \text{ %lukemasta})$
Vasteaika	T90 < 60 s	T90 < 60 s
IP-luokitus	IP65	IP65
Käyttöolosuhteet	-40...60 °C 500...1100 hPa 0...100 %RH	-40...60 °C 850...1100 hPa 0...100 %RH
Lämpötilariippuvuus	10...50 °C: $\pm 0,05$ %lukemasta/°C -40...60 °C: $\pm 0,1$ %lukemasta/°C	-20...45 °C: $\pm(1 + c/1000)$ ppm/°C*
Paineriippuvuus	$\pm 0,015$ %lukemasta/hPa	<i>ei määritelty</i>
Stabiilisuus*	0...3000: $\pm 60$ ppm/vuosi 3000...6000: $\pm 150$ ppm/vuosi 6000...10 000: $\pm 300$ ppm/vuosi	<i>ei määritelty</i>

\* osassa laitteita määrittely jaettu pitoisuuksien perusteella

Taulukko 6. KCD-HP100A- ja EE820-mittalaitteiden määrittelyvertailu [41; 42].

	KCD-HP100A	EE820
Mittausalue	0...10 000 ppm	0...10 000 ppm
Tarkkuus	$\pm(300 \text{ ppm} + 2 \text{ %lukemasta})$	$\pm(100 \text{ ppm} + 5 \text{ %lukemasta})$
Vasteaika	T63 < 65 s	Standardi: T63 < 300 s Nopea: T64 < 140 s
IP-luokitus	<i>ei määritelty</i>	IP54
Käyttöolosuhteet	5...45°C <i>paine ei määritelty</i> 0...95 %RH	-20...60°C <i>paine ei määritelty</i> 0...100 %RH
Lämpötilariippuvuus	<i>ei määritelty</i>	-20...45 °C: $\pm 1$ ppm/°C
Paineriippuvuus	<i>ei määritelty</i>	<i>ei määritelty</i>
Stabiilisuus	<i>ei määritelty</i>	<i>ei määritelty</i>

### 3.3.1 Vaisala GMP252 -mittapää

Ensimmäinen valittu testattava laite oli suomalaisen Vaisala Oyj:n GMP252-mittapää (kuva 8). Laite valittiin testattavaksi, koska tuote oli juuri tuotu markkinoille ja Vaisalalla on historiallisesti hyvä maine mittalaittevalmistajana. Laite on optimoitu 0...10 000 ppmCO<sub>2</sub>:n mittausalueelle, mutta mittaa 30 000 ppmCO<sub>2</sub>:n pitoisuuteen asti heikommalla tarkkuudella. [36.]

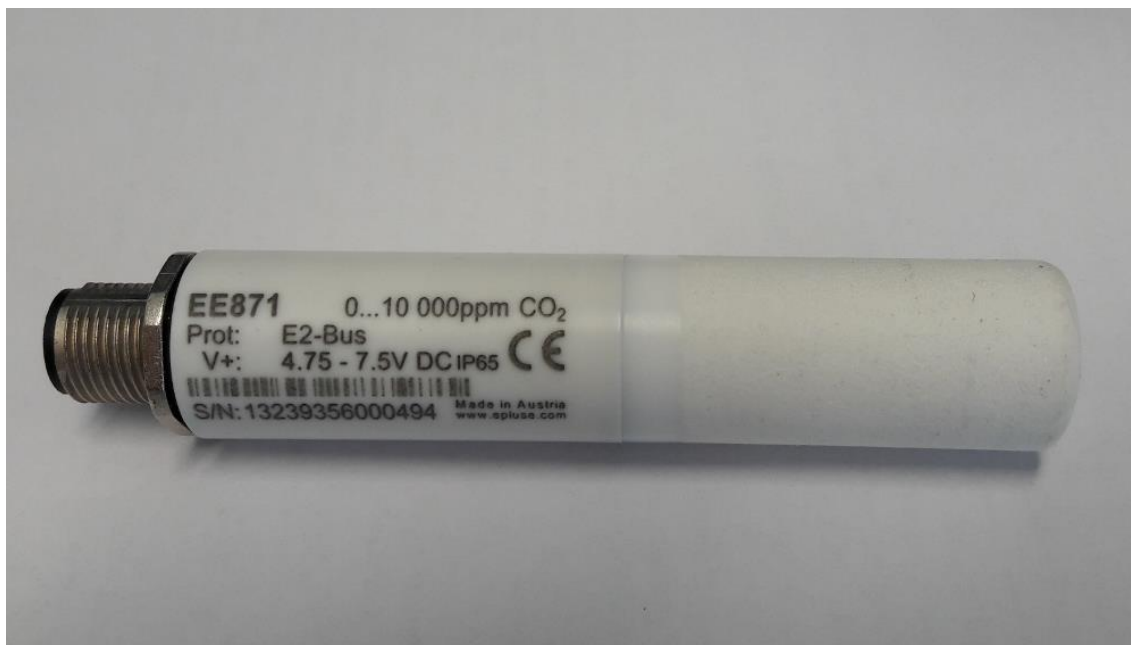


Kuva 8. Vaisalan GMP252-mittapää.

Laitteessa käytettävä Vaisala CARBOCAP® -anturi on piihin perustuva NDIR-anturi. Anturissa infrapuna johdetaan mitattavan kaasun sisältävän kyvetin läpi peilille, joka heijastaa säteen thermopile-ilmaisimelle. Prosessi toistetaan kaksi kertaa säätäen aallonpituutta sähköisesti säädettävällä FPI:llä: kerran absorptioaallonpituudella ja kerran absorptiottomalla aallonpituudella. Näiden kahden signaalin voimakkuudesta saadaan laskettua hiilidioksidipitoisuus. [33; 43.] Valonlähteenä toimii Vaisalan patentoitu mikro-hehku, jonka tarkoituksena on parantaa valonlähteen elinikää, energiankulutusta ja tuotannollisuutta [27]. Rakenteeltaan hyvin avoimen kyvetin ympärillä on sinteröidystä PTFE:stä valmistettu vaihdettava mekaaninen suodin, joka päästää lävitseen kaasua, mutta suojaa anturia pölyltä ja vedeltä. Anturin sirut on suljettu hermeettisten ikkunoiden taakse TO5-pakkaukseen, jossa ne ovat suojassa kosteudelta ja lialta. Lisäksi käytössä on lämmityspiri, joka estää kondensaatiota normaaleissa käyttöympäristöissä. [33.]

### 3.3.2 E+E 870 -mittapää

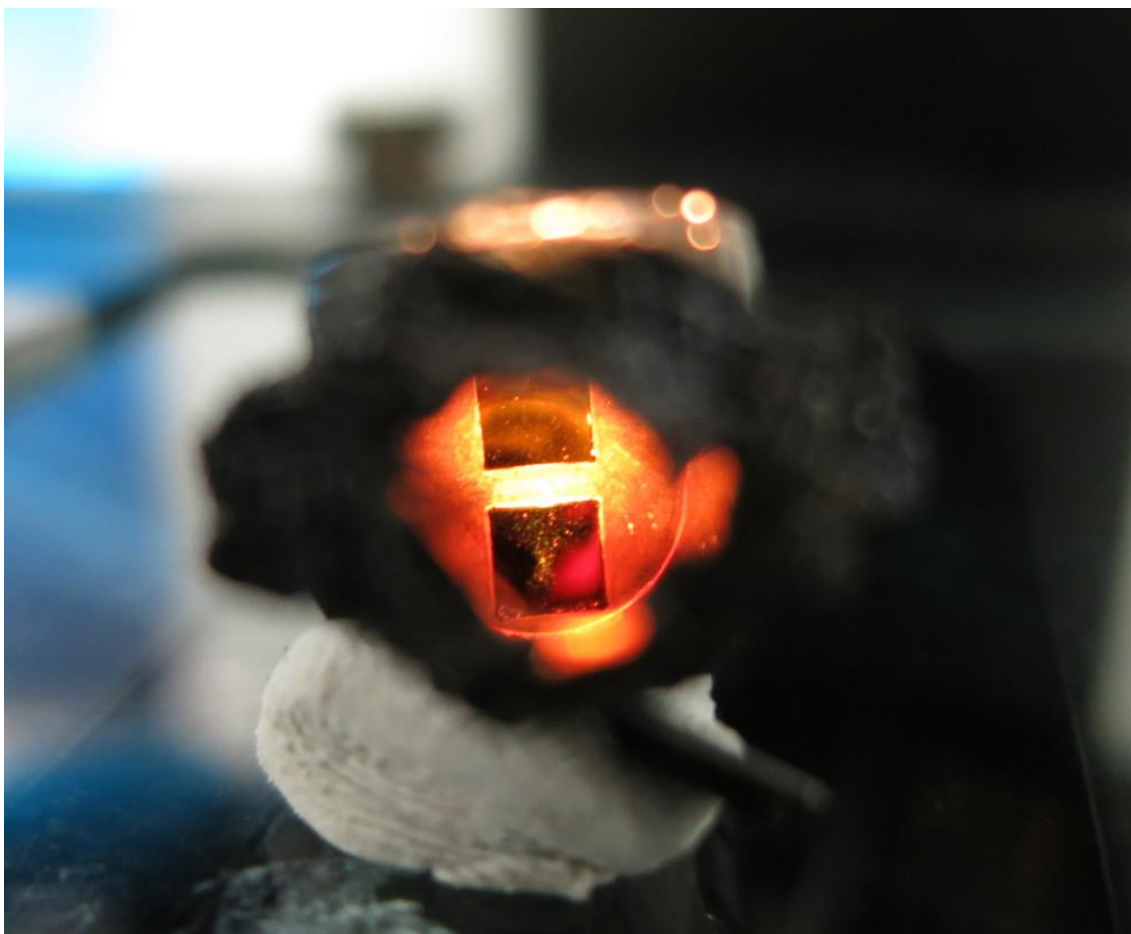
Lisäksi testaukseen valittiin itävaltalaisen E+E:n EE870-mittapää (kuva 9). E+E on maailmalla tunnettu mittalaittevalmistaja, ja EE870 on sen tuote ppm-luokan hiilidioksidimittalaitemarkkinoille. GMP252:n tapaan EE870 on tehty 0...10 000 ppmCO<sub>2</sub>:n mitta-alueelle [34].



Kuva 9. E+E 870 -mittapää

Anturin toiminta perustuu kahden aallonpituuden NDIR-teknologiaan. Mittapään runkoon kierrettävän mekaanisen suotimen alla on musta anturielementti, joka sisältää valonlähteen ja kahdesta optisesta kaistanpäättösuotimesta päätellen kaksi detektoria, jotka mittaavat eri aallonpituuksia. Myös tässä anturissa sirut on suljettu TO5-pakkaukseen suojaan kosteudelta ja lialta. Täysin samannäköinen anturielementti (kuva 10) on myös E+E:n 820-seinälähettimessä ja 850-duktilähettimessä.





Kuva 10. E+E:n anturielementin sisältä paljastuvat kaksi ikkunaa.

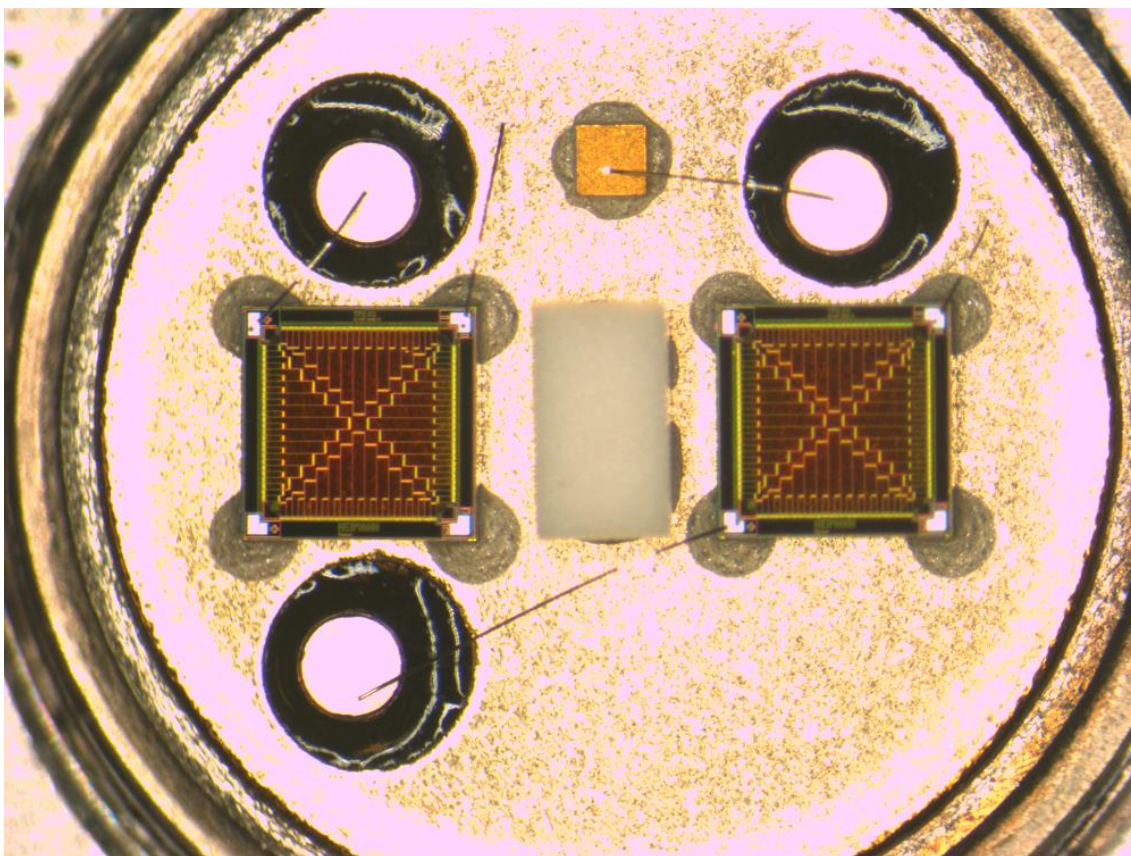
### 3.3.3 SenseCube KCD-HP100A -mittapää

Korealaisen SenseCuben KCD-HP100A-mittapää (kuva 11) on myös alueelle 0...10 000 ppmCO<sub>2</sub>. Laite on kuitenkin huomattavasti edullisempi kuin Vaisalan ja E+E:n saman mittausalueen laitteet. Laitteen odotetaan tuovan perspektiiviä siihen, millainen mittauskyky voidaan saavuttaa edullisemmalla tuotteella.



Kuva 11. SenseCube KCD-HP100A -mittapää.

Myös tämän laitteen toiminta perustuu kahden aallonpituuden NDIR-teknologiaan. Kärjessä olevasta valonlähteestä infrapuna kulkee optisen matkan halki TO5-pakkauksessa suojassa kosteudelta ja kontaminaatiolta oleville kahdelle ilmaisimelle (kuva 12), joiden kunkin päällä on eri aallonpituuksille säädetyt kaistanpäästösuitimet. Kummankin kaistanpäästösuitimen välissä on pieni koroke, jonka syyksi arvelen heijastusten estämisen. Valonlähteenä toimii pieni hehkulamppu (kuva 13).



Kuva 12. KCD-HP100A-mittapään kaksi ilmaisinta.



Kuva 13. KCD-HP100A-mittapään putken päässä valonlähteenä toimii hehkulamppu. Kuvassa näkyy myös metallin työstämisestä jäänyttä jäystettä.

### 3.3.4 E+E 820 -seinälähetin

E+E:n 820 on ainoa testaukseen valittu mittalaite, joka ei ole mittapää, vaan seinälähetin (kuva 14). Huonomman IP-luokituksensa takia seinälähettimet eivät tyypillisesti sovellu yhtä hyvin prosessien hallintaan, vaan niitä käytetään yleisemmin ilmanlaadun kontrollointiin. Mittausalueeltaan EE820 on kuitenkin sama kuin muut testaukseen valitut laitteet: 0...10 000 ppmCO<sub>2</sub>.

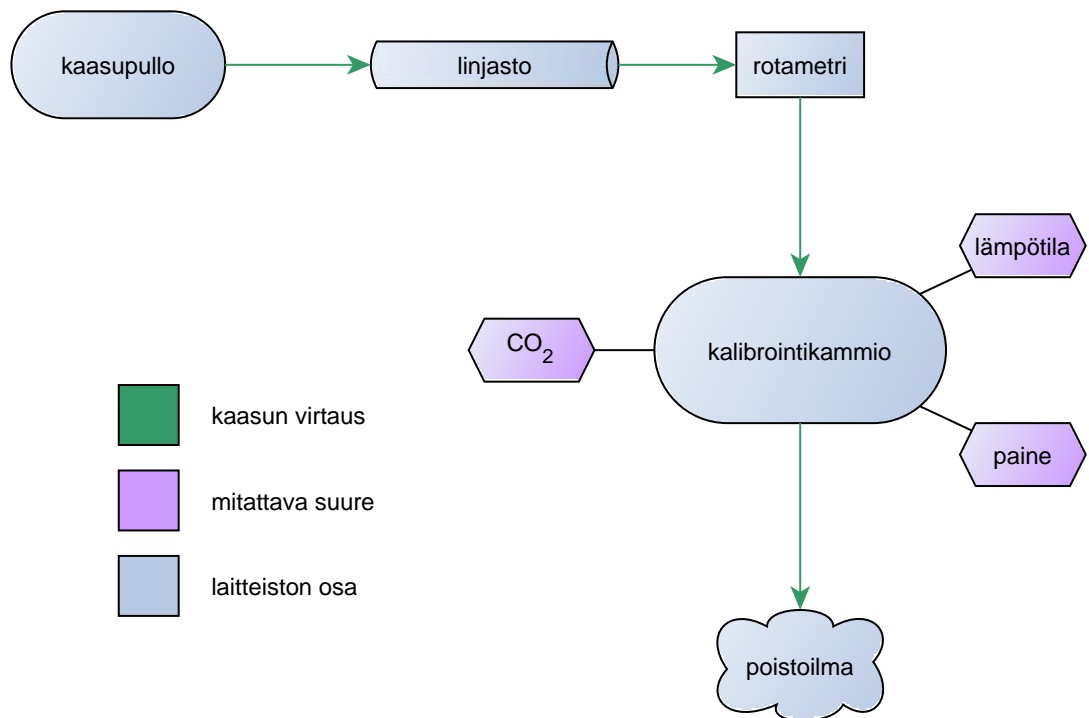


Kuva 14. E+E 820 –seinälähetin.

Ilma tulee kannessa näkyvän suodatinkalvon läpi piirilevyllä sijaitsevalle anturielementille, joka on rakenteeltaan sama kuin EE870-mittapäässäkin. Laitteita oli testauksessa kolme, ja niistä yksi oli valmistajan mukaan *nopeammalla vasteajalla*. Tämä nopealla vasteajalla varustettu tuote oli ilmeisesti muuten sama kuin muut kaksi laitetta, mutta sen kannen suodattimen alla vasteaikaa nopeuttamassa oli tuuletin.

#### 4 Hiilidioksidimittalaitteiden testaus

Työssä testatuille laitteille valittiin testejä, joissa kokeiltiin sovellusten kannalta olennaisia ominaisuuksia: mittaustarkkuus, vasteaika, mittaus lämpötila-alueen yli ja stabiilius. Kaikkiin suoritettuihin testeihin kuuluu osa, jossa mittalaite mittaa hiilidioksidipitoisuutta, ja tältä osalta testilaitteisto on jokaisessa testissä perusidealtaan sama. Hiilidioksidimittalaitteet ovat suljetussa kalibrointikammiossa, jonka sisällä olevaa hiilidioksidipitoisuutta mitataan. Myös kammion lämpötila ja paine testin ajalta kirjataan muistiin. Hiilidioksidia johdetaan kaasupullostakammioon kaasulinjojen kautta rotametrimillä sen verran pieni virtaus säätäen, että hiilidioksiditaso säilyy, mutta kammio ei kuitenkaan paineistu. Laitteesta riippuen dataa kirjattiin muistiin kahdella eri tavalla: Vaisalan GMP252-mittapäällä dataa saatiin tietokoneelle USB-väylän välityksellä ja muiden mittalaitteiden analogista ulostuloa logattiin Vaisalan dataloggerilla. GMP252 sai virtansa USB:n kautta ja muut laitteet saivat virtansa erillisestä virtalähteestä. Kuvassa 15 on havainnollistettu mittauslaitteiston rakennetta.



Kuva 15. Käytetyn kalibrointilaitteiston toimintaperiaate.





Kuva 16. GMP252- ja EE870-laitteet kalibroitikammiossa.

#### 4.1 Mittaustarkkuus

Mittaustarkkuuskokeessa mitataan mittalaitteiden kykyä määrittää ympäristön hiilidioksidipitoisuus mahdollisimman tarkasti. Mittaustarkkuutta testataan seuraavasti:

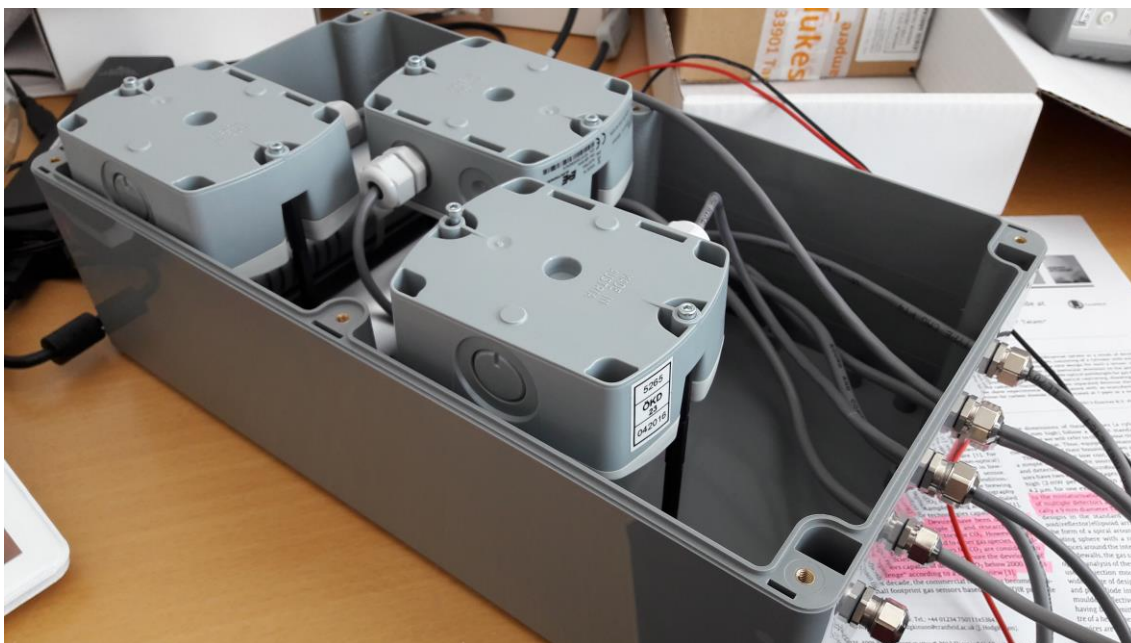
1. Laitetaan hiilidioksidimittalaite mittaamaan olosuhdetta, jonka hiilidioksidipitoisuus tiedetään.
2. Otetaan pitoisuudesta sen verran näytteitä, että niistä keskiarvoistamalla saadaan minimoitua epävarmuustekijät.
3. Lasketaan saaduista näytteistä keskiarvo.
4. Lasketaan keskiarvon poikkeama tunnetusta pitoisuudesta. [44.]

Valmistajat kalibroivat mittalaitteet muutamassa pitoisuudessa, ja mittalaitteen tarkkuus on yleensä paras näissä pitoisuuksissa ja niiden lähetyvillä. Mittaustarkkuus heikkenee siirryttäessä pois päin kalibrointipisteistä. Tämän takia testi on hyvä toistaa usealla eri pitoisuudella, jolloin saadaan paikannettua mahdollisia heikomman tarkkuuden mitta-alueita.

Testin suorittamisessa on muutamia lieviä epävarmuustekijöitä, jotka vaikuttavat testin tulosten luotettavuuteen. Testissä käytettävien kaasujen tarkkoja pitoisuuksia ei voida tietää: toimittajat ilmoittavat pitoisuuden mukana toleranssirajat, joiden sisällä pitoisuus vaihtelee [45]. Mikäli testausjärjestelmää ei saada toteutettua tarpeeksi tiiviiksi, voivat paine-erot järjestelmän ja ulkoilman välillä sekoittaa pitoisuuteen ei-haluttua kaasua ja muuttaa pitoisuutta.

Tässä työssä testi suoritettiin neljässä eri CO<sub>2</sub>-pitoisuudessa. Pitoisuuksiksi valittiin laitteiden mittauksen ala- ja ylärajat 0 ja 10 000 ppm. Rajojen väliltä valittiin kaksi välipistettä: 496 ppm edustamaan suurin piirtein ulkoilman tasoa ja 2 000 ppm tarkentavaksi pisteeksi 496:n ja 10 000 ppm:n välille. Kussakin testissä kerättiin mittapisteitä talteen 30 minuuttia.

Testi suoritettiin kahdessa osassa: ensin GMP252- ja EE870-laitteille ja sitten EE820- ja KCD-HP100A-laitteille. GMP252- ja EE870-laitteiden mittaamiseen käytettiin valmista GMP252:n kalibrointikammiota. KCD-HP100A- ja EE820-laitteita varten kehitettiin oma kalibrointikammio.



Kuva 17. SenseCube KCD-HP100A- ja E+E EE820 -mittalaitteille suunniteltu kalibroitinkammio kansi auki.

## 4.2 Vasteaika

Vasteaikakokeessa mitataan laitteen nopeutta reagoida ympäristössä tapahtuviin muutoksiin hiilidioksidipitoisuudessa.

Vasteaikaa testataan seuraavasti:

1. Laitetaan hiilidioksidimittalaite kammioon, jonka hiilidioksidipitoisuus tiedetään, ja otetaan sieltä näytteitä muutaman minuutin ajan
2. Siirretään mittaava laite toiseen tunnettuun pitoisuuteen jatkuvasti näytteitä ottaen.
3. Lasketaan talteen otetuista mittapisteistä, kuinka kauan laitteella kestää saavuttaa 63 % ja 90 % tapahtuneesta muutoksesta. [44.]

Tässä työssä vasteaikakoe suoritettiin kaikille neljälle laitteelle. Testi suoritettiin tuomalla 1 %CO<sub>2</sub>-pitoisuuteen saatetusta kammioista laboratorio-olosuhteeseen (~440 ppmCO<sub>2</sub>). Laboratorio-olosuhde voitiin valita testin päätepitoisuudeksi, sillä voidaan olettaa, että pitoisuuden pienet heilahtelut eivät vaikuta 63 % ja 90 % muutoksesta saavuttamiseen merkittävästi.



#### 4.3 Mittaus lämpötila-alueen yli

Lämpötila-alueen yli mittauksen kokeessa testataan mittalaitteen kykyä mitata tarkasti lämpötila-alueen äärirajoilla.

Testi suoritetaan seuraavasti:

1. Laitetaan hiilidioksidimittalaite kammioon, jonka hiilidioksidipitoisuus ja lämpötila tiedetään.
2. Otetaan pitoisuudesta sen verran näytteitä, että niistä keskiarvoistamalla saadaan minimoitua epävarmuustekijöiden vaikutus.
3. Lasketaan näytteistä keskiarvo.
4. Lasketaan keskiarvon poikkeama tunnetusta pitoisuudesta.
5. Toistetaan testi useassa eri lämpötilassa.

Lämpötila-alueen yli mittauksen testissä on samat haasteet kuin normaaliolosuhteen mittaustarkkuuden testissäkin. Tämän lisäksi virhettä voi tuoda kammion lämpötilan säädön epätarkkuus.

Testi suoritettiin GMP252- ja EE870-laitteille, sillä niiden lämpötila-alueet olivat huomattavasti laajemmat kuin kahden muun laitteen ja ne olivat ainoat laitteet, jotka kokonsa puolesta saatiin helposti testattavaksi lämpökaappiin.

#### 4.4 Pitkän ajan stabiilisuus

Stabiilisuuskokeella testataan, kuinka hyvin näyttämä pysyy kohdillaan mittalaitteen ikääntyessä. Pitkän ajan stabiilisuuden tarkkaileminen optimaalisessa käyttöolosuhteessa (tyypillisesti  $\sim 25\text{ °C}$  ja 1013 mbar) vie paljon aikaa. Pitkän ajan kuluessa tapahtuvia muutoksia voidaan kuitenkin saada esiin Accelerated Life Testingillä (ALT), jossa tuote altistetaan normaalia suuremmalle rasitukselle, mikä kiihdyttää ajan kanssa esiintyvien ongelmien ilmentymistä [46]. Hiilidioksidimittalaitteille tämä voidaan totetuttaa esimerkiksi koholla olevassa lämpötilassa ja suhteellisessa kosteudessa Jatkuva kostea lämpö -testinä. Korkea lämpötila voi esimerkiksi hajottaa muoveja ja ylikuumentaa tuotetta, kun taas korkea kosteus voi aiheuttaa kondenssia, veden imemistä ynnä muu-

ta sellaista [47]. Standardin IEC 60068-2 mukaisen Jatkuva kostea lämpö -testin suositellut testausajat ovat 12 h, 16 h, 24 h, 2 vrk, 4 vrk, 10 vrk, 21 vrk tai 56 vrk. [48.]

Jatkuva kostea lämpö -testi suoritetaan seuraavasti:

1. Näytteet tutkitaan ennen altistusta visuaalisesti ja mekaanisesti. Tarkistetaan laitteen kalibrointi valituissa tarkkailtavissa pitoisuuksissa.
2. Otetaan laite pois altistuksesta kalibroinnin tarkistukseen tasaisin väliajoin.
3. Tarkkaillaan datasta, miten mittalaitteen lukema muuttuu kalibroinnin tarkistusten välillä. [48.]

Olosuhteeksi valittiin 37 °C ja 90 %RH. Olosuhde oli laitteiden määritysten mukaan kestävässä oleva, mutta kuitenkin sen verran vaativa, että muutoksia mittauskyvyssä saatettaisiin saada. Olosuhdekaappien tilavaatimusten takia altistukseen saatiin rajallinen määrä laitteita, ja näin ollen pitkän ajan stabiilisuustestiin valittiin laitteista vain Vaisalan GMP252- ja E+E:n EE870 -mittapäät, joiden odotettiin suoriutuvan testeistä parhaiten. Laitteet laitettiin kammioon takapaneelissa olevan läpiviennin kautta siten, että ne lepäsivät pienessä kosketuksessa kaapin välitason kanssa (kuva 18).

Altistukseen valitut mittapäät kalibroitiin ennen altistukseen laittamista, 15 päivän altistuksessa kuluttua, ja loppumittaus suoritettiin 33 päivän kuluttua. Pitoisuuksiksi valittiin samat pitoisuudet kuin mittaustarkkuustestissäkin: 0, 496, 2 000 ja 9 960 ppmCO<sub>2</sub>.

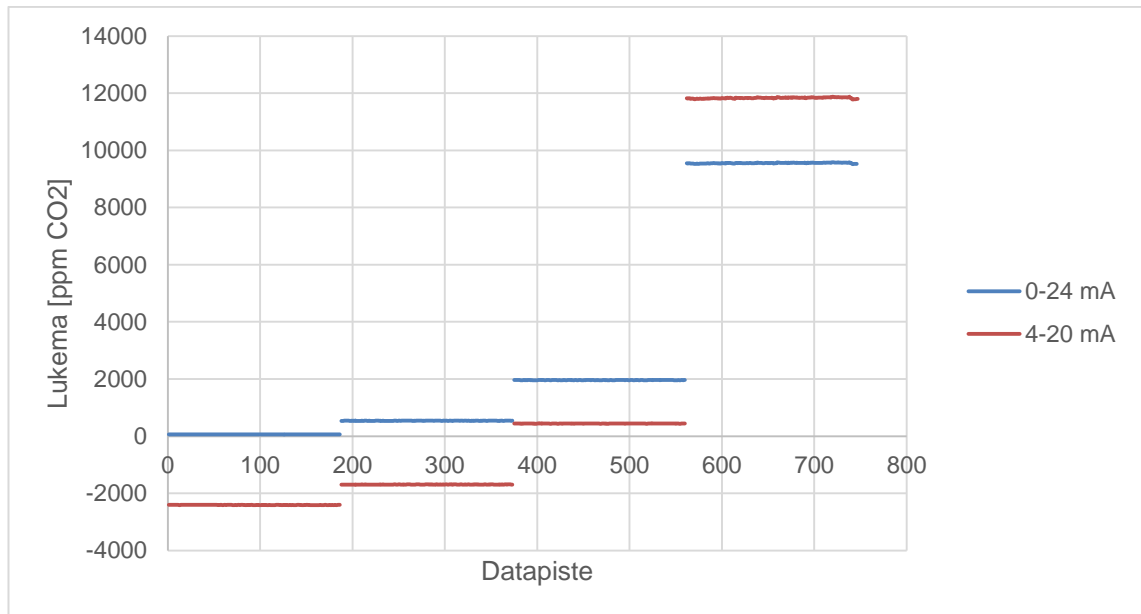


Kuva 18. GMP252- ja EE870 -mittapääät lämpötila- ja kosteusaltistuksessa.

## 5 Testitulokset

### 5.1 KCD-HP100A:n testauksessa ilmenneet skaalaamisongelmat

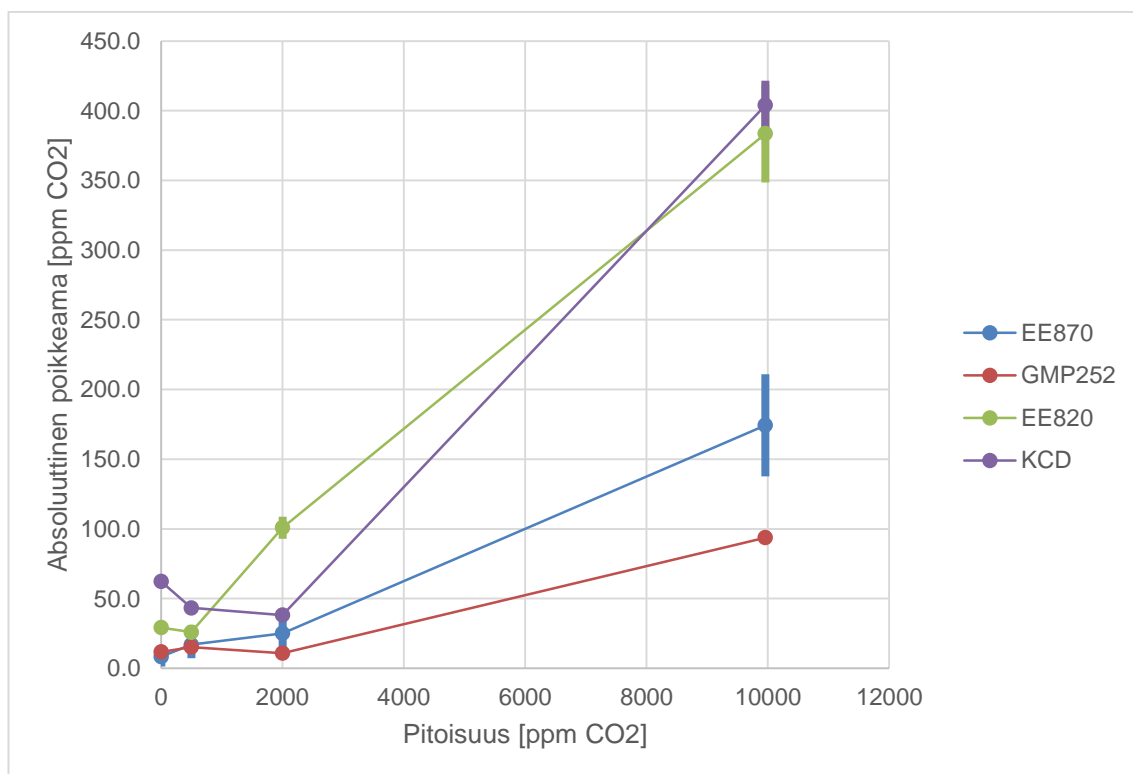
SenseCuben KCD-HP100A-laitteita testattaessa havaittiin erikoisia asioita laitteiden käytöksessä. Testausta varten oli tilattu kolme laitetta 4–20 mA:n analogisella ulostulolla. Laboratoriossa ilman CO<sub>2</sub>-pitoisuudessa (~440 ppm) saatiin laitteesta kuitenkin signaalia ulos noin 1,3 mA. Kun laite saatettiin 10 000 ppm:n CO<sub>2</sub>-pitoisuuteen saatiin signaalia 22,2–23,5 mA. Valmistajaan otettiin yhteyttä sähköpostitse ja kysyttiin asiasta, mutta vastausta ei työn valmistumishetkeen mennessä ollut saapunut. 4–20 mA:n mukaan skaalattaessa ei tuloksissa ole järkeä, ja havaittiin, että 0–24 mA:n mukaan skaalattaessa lukemat osuvat jotakuinkin kohdilleen, joten opastettu oikea skaalausta pa vaihdettiin tähän. Tätä 0–24 mA:n skaalausta on käytetty myös työssä esitetyissä tuloksissa.



Kuva 19. SenseCube KCD-HP100A -laitteen alkuperäinen ja korjattu skaalaus esitettynä graafisessa muodossa pitoisuuksissa 0, 496, 2 000 ja 10 000 ppmCO<sub>2</sub>.

## 5.2 Mittaustarkkuus

Kuvassa 20 esitetään mittaustarkkuustestin testitulokset. Kuvassa näkyy laitteiden keskimääräisen näyttämävirheen riippuvuus mitattavasta pitoisuudesta lämpötilassa 25 °C. Kuvaajassa on myös näkyvissä pystypalkein kunkin laitteen keskihajonta. Lisäksi mittapisteistä koottussa taulukossa 7 esitetään numeraalisesti laitteiden näyttämä, poikkeama pitoisuudesta, suhteellinen poikkeama ja datalehdissä esiintyvä sallittu poikkeama kussakin pitoisuudessa.



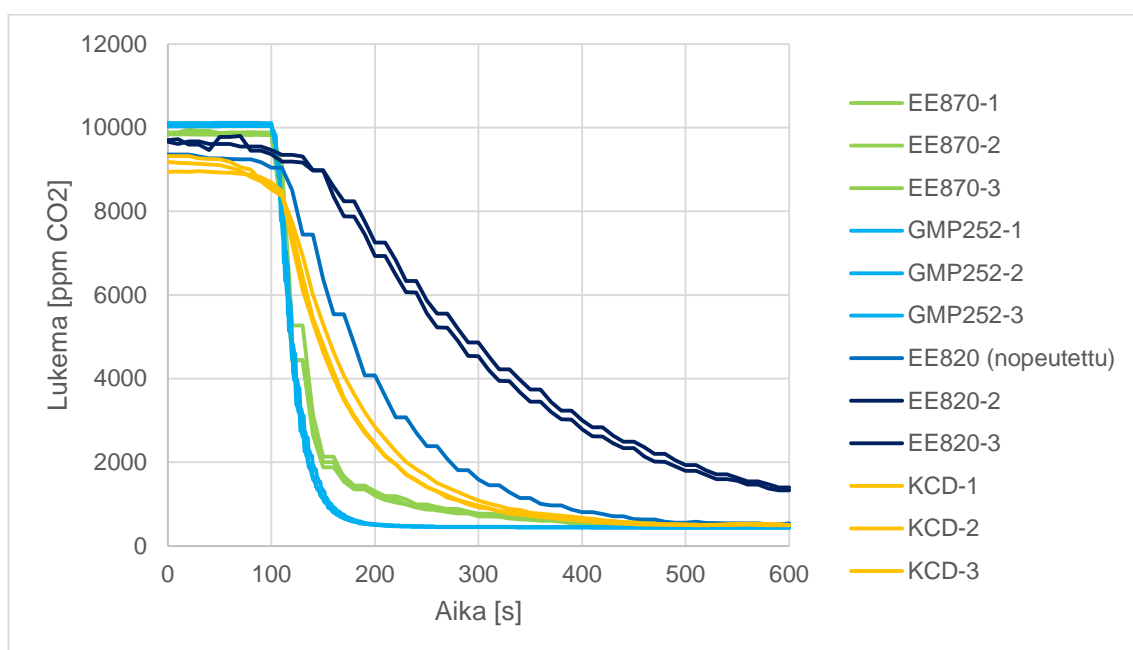
Kuva 20. Mitattujen laitteiden näyttämävirhetestin 25 °C / 1013 hPa tulokset graafisesti esitettynä.

Taulukko 7. Tarkkuusmittauksessa mitatut näyttämät ja niistä lasketut suhteelliset poikkeamat.

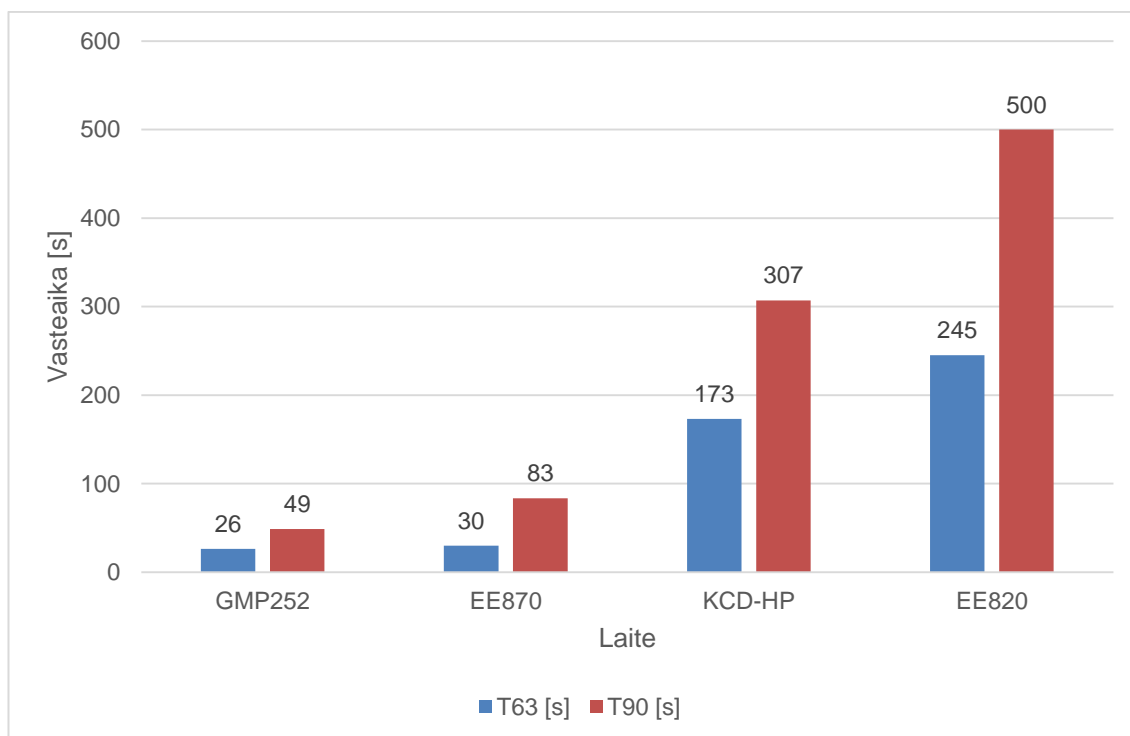
Laite	Pitoisuus (ppmCO <sub>2</sub> )	Näyttämä (KA, ppmCO <sub>2</sub> )	Poikkeama (KA, ppmCO <sub>2</sub> )	Suhteellinen poikkeama (KA)	Sallittu poikkeama (ppmCO <sub>2</sub> )
EE870	0	6,8	8,3	-	100
	496	507,1	17,0	0,03	125
	2000	2009,1	25,1	0,01	200
	9960	9785,6	174,4	0,02	598
GMP252	0	11,7	11,7	-	40
	496	511,2	15,2	0,03	40
	2000	2010,1	10,8	0,01	40
	9960	10053,8	93,8	0,01	199
KCD-HP100A	0	62,3	62,3	-	300
	496	539,3	43,3	0,09	310
	2000	1961,8	38,2	0,02	340
	9960	9555,9	404,1	0,04	499
EE820	0	29,2	29,2	-	100
	496	470,1	25,9	0,05	125
	2000	1899,1	100,9	0,05	200
	9960	9576,4	383,6	0,04	598

### 5.3 Vasteaika

Kahdessa osassa tehdyn vasteaikatestin aikaiset näyttämät on yhdistetty yhteen kuvaajaan (kuva 21). Todellisuudessa eri aikaan tehdyt testit on sovitettu keskenään siten, että kaikissa olosuhteiden muutos tapahtuu sekunnin 100 kohdalla. Kuvassa 22 on lisäksi pylväsdiagrammi kunkin tuotteen keskiarvoisesta vasteajasta, ja taulukossa 8 ovat näkyvissä tuotekohtaiset spesifikaatiot ja niiden täyttyminen. Tulokset on GMP252-, EE870- ja KCD-HP100A-laitteille esitetty kolmen eri laitteen tulosten keskiarvona. EE820-laitteita oli kaksi normaalia kappaletta ja yksi kappale ”nopeutetulla” vasteajalla.



Kuva 21. Testattujen hiilidioksidimittalaitteiden näyttämän käyttäytyminen, kun ne siirretään 1 %:n CO<sub>2</sub>-pitoisuudesta huoneilmaan.



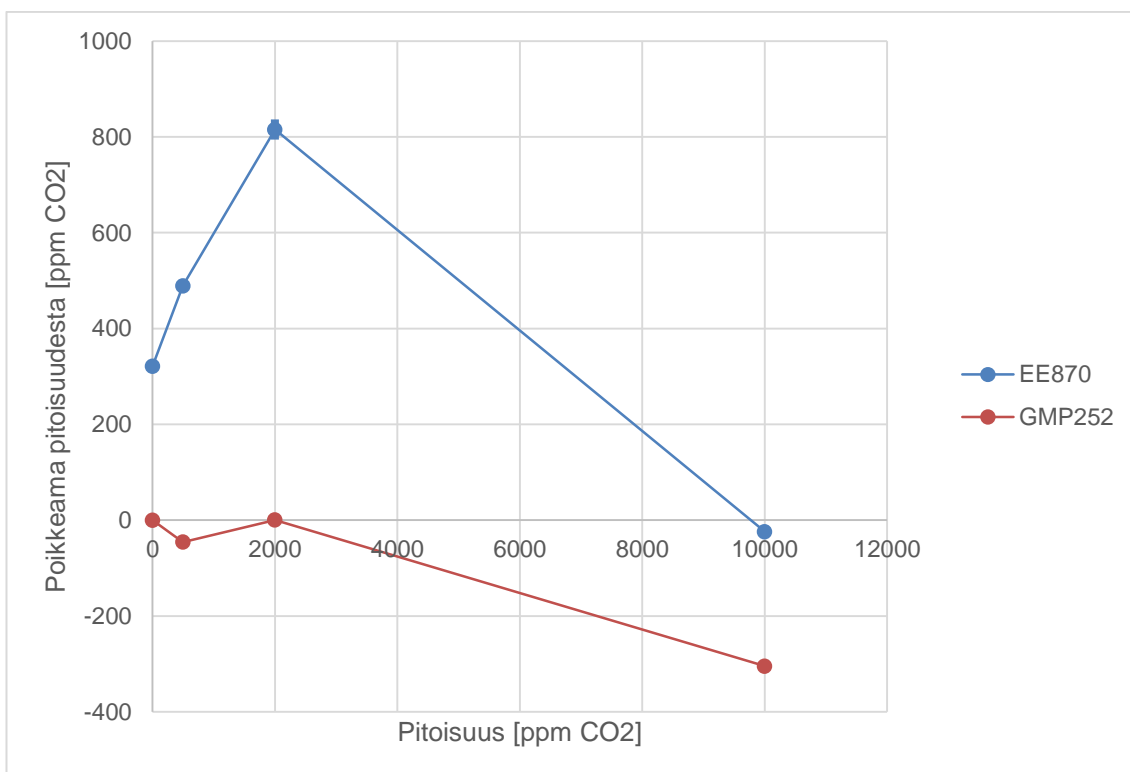
Kuva 22. Vasteaikatestin tulokset. Montako sekuntia laitteella kestää, ennen kuin muutoksen jälkeen on saavutettu 63 % ja 90 % muutoksen suuruudesta.

Taulukko 8. Mitatut laitteet, niiden datalehdissä esitetyt määrittelyt vasteajalle ja lupauksen toteutuminen.

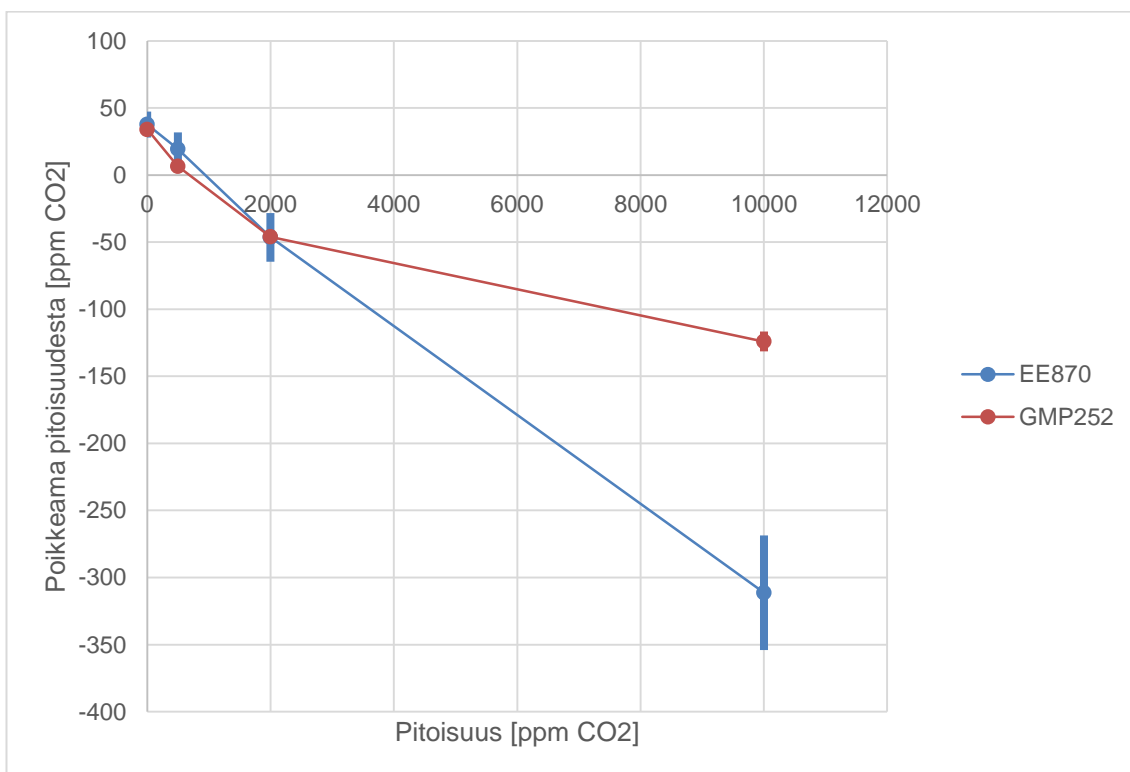
Laite	Tyyppi	Määrittely	T63 [s]	T90 [s]
GMP252	Mittapää	T90 < 60 s	26	49
EE870	Mittapää	T90 < 60 s	30	83
KCD-HP100A	Mittapää	T63 < 65 s	173	307
EE820	Seinälahetin	T63 < 300 s	245	500

#### 5.4 Mittaus lämpötila-alueen yli

GMP252- ja EE870-mittalaitteiden mittaustarkkuuden riippuvuus pitoisuudesta lämpötiloissa -40 ja 60 °C on esitetty kuvissa 23 ja 24. Kuvissa pystyakselilla on itsearvoistetun poikkeaman sijaan poikkeama etumerkkineen, jotta näkyviin saadaan myös se, kumpaan suuntaan laite näyttää lämpötilassa. Tämän lisäksi näkyviin on tuotu molempien testien aikaiset näyttämät piirrettynä kuvaajalle (kuvat 25 ja 26). Taulukossa 9 on laitteiden näyttämä, poikkeama pitoisuudesta ja suhteellinen poikkeama. Kumpikaan laite ei ollut määritellyt suorituskykyä lämpötilan äärirajoilla, joten sallitusta poikkeamasta ei tässä ole mainintaa.

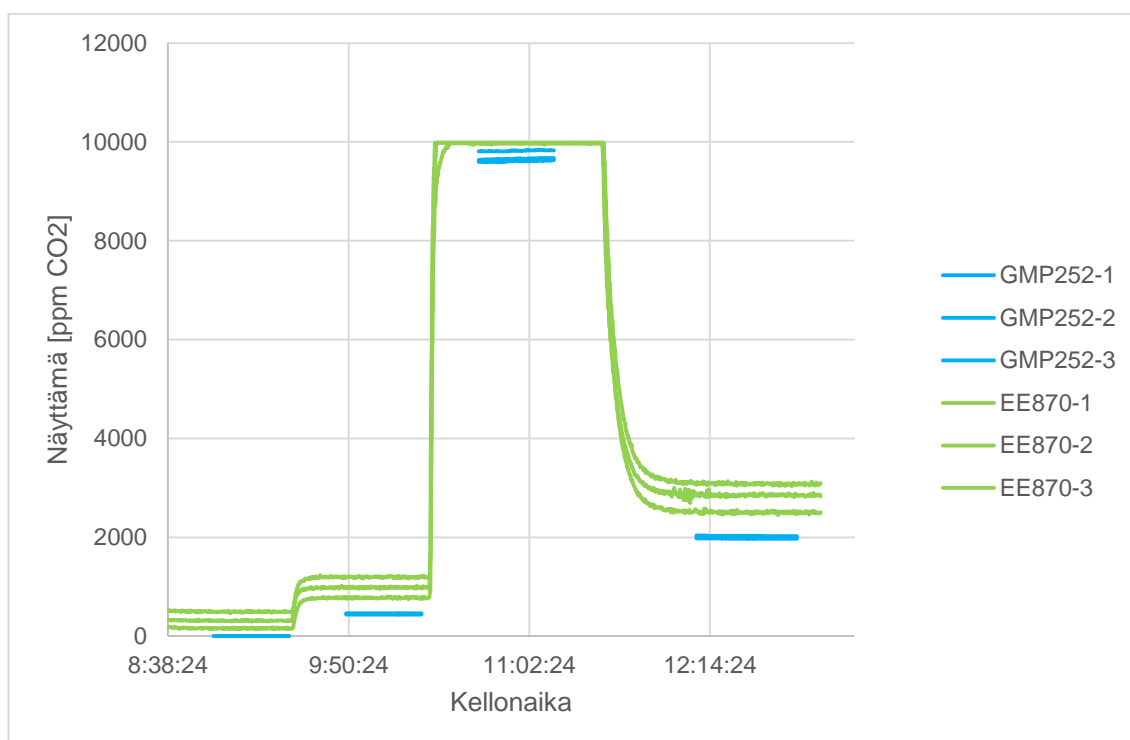


Kuva 23. Mitattujen laitteiden matalassa lämpötilassa (-40 °C / 1013 hPa) mittauksen tarkkuus-testin tulokset graafisesti esitettynä.

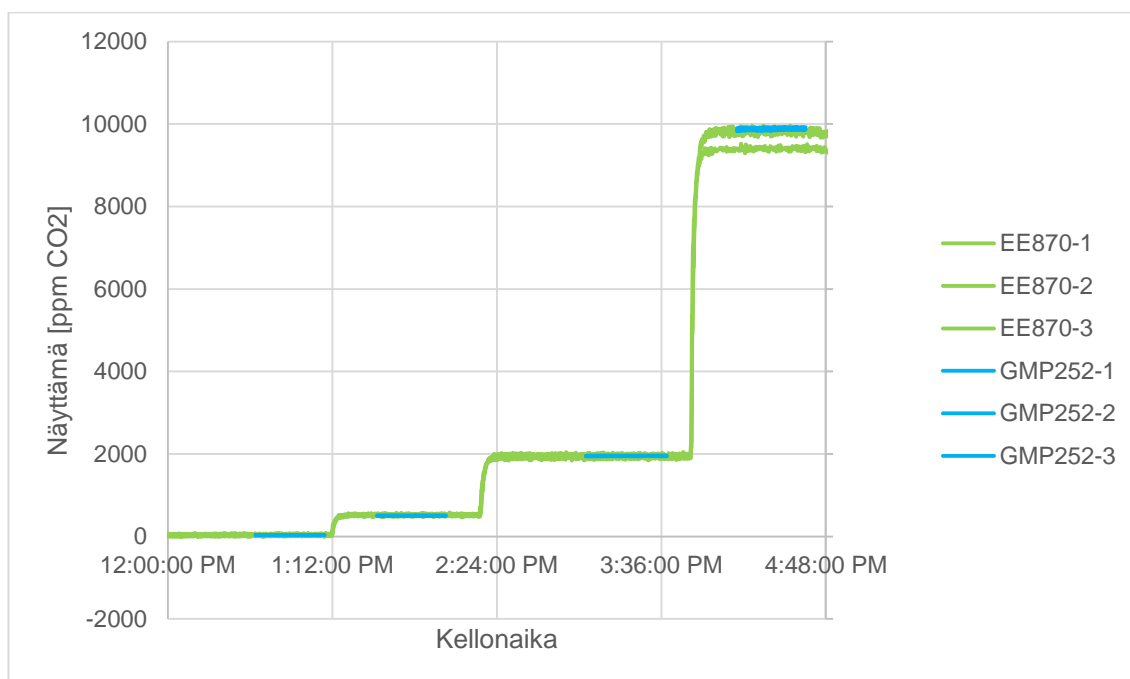


Kuva 24. Mitattujen laitteiden korkeassa lämpötilassa (60 °C / 1013 hPa) mittauksen tarkkuus-testin tulokset graafisesti esitettynä.





Kuva 25. Laitteiden näyttämät -40 °C:n testin ajalta. Pitoisuudet 0, 496, 9 960 ja 2 000 ppmCO<sub>2</sub>.



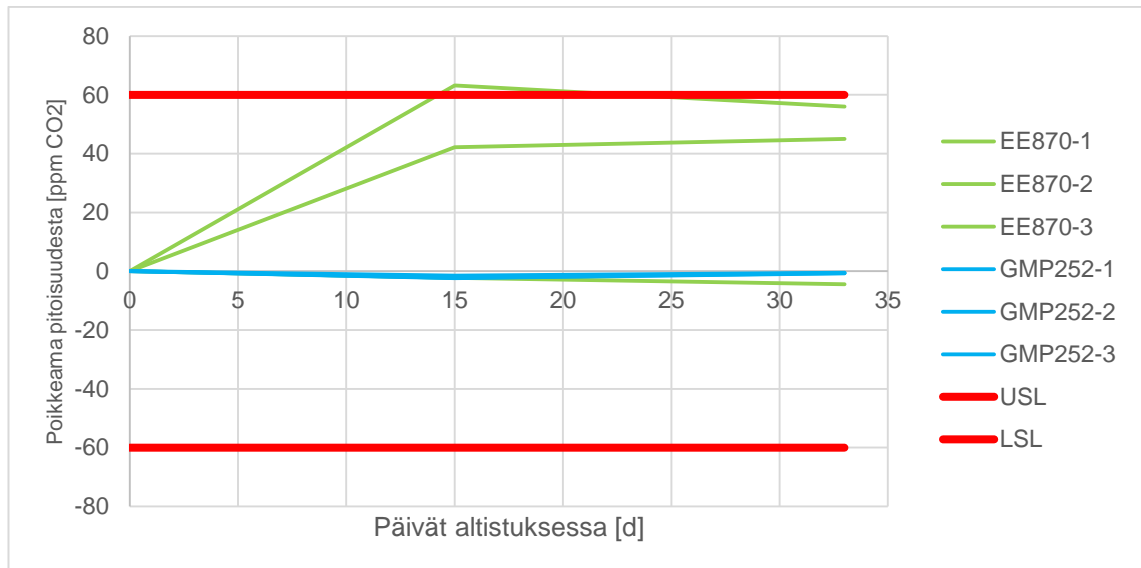
Kuva 26. Laitteiden näyttämät 60 °C:n testin ajalta. Pitoisuudet 0, 496, 2 000 ja 9 960 ppmCO<sub>2</sub>.

Taulukko 9. Testitulokset lämpötilaolosuhteessa mittaamisen testistä. EE870- ja GMP252-laitteiden näyttämä, poikkeama ja suhteellinen poikkeama -40:n ja 60 °C:n lämpötiloissa kaikissa pitoisuuksissa.

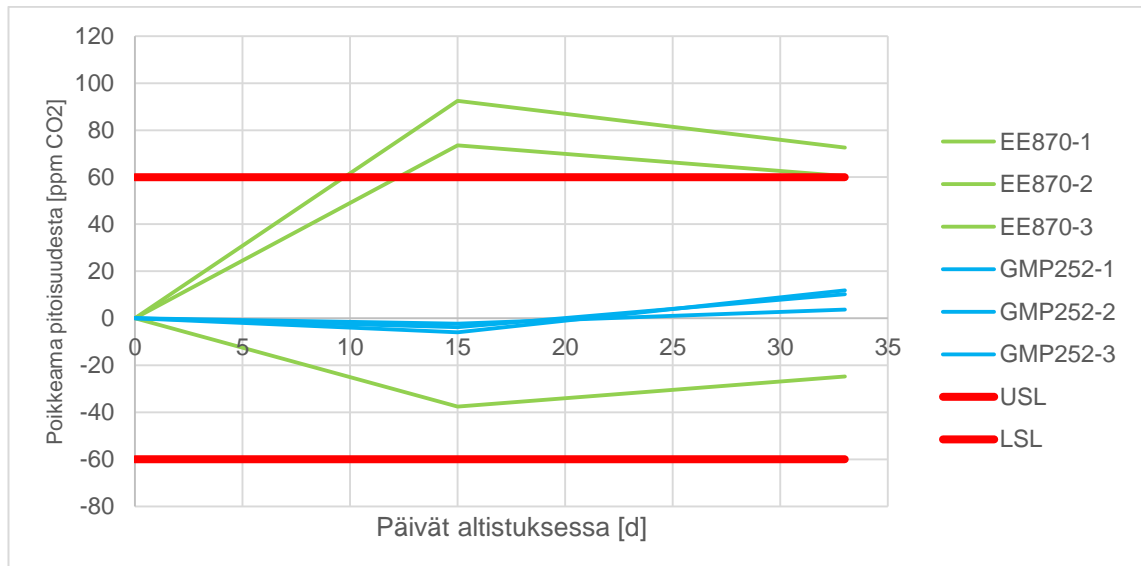
Laite	Lämpötila	Pitoisuus (ppmCO <sub>2</sub> )	Näyttämä (KA, ppmCO <sub>2</sub> )	Poikkeama (KA, ppmCO <sub>2</sub> )	Suhteellinen poikkeama (KA)
EE870	-40	0	321,2	321,2	-
		496	985,2	489,2	0,99
		2000	2815,2	815,2	0,41
		9960	9975,9	15,9	0,00
	60	0	37,7	37,7	-
		496	515,4	19,4	0,04
		2000	1953,5	-46,5	-0,02
		9960	9688,7	-271,3	-0,03
GMP252	-40	0	0,0	0,0	-
		496	450,2	-45,8	-0,09
		2000	2000,3	0,3	0,00
		9960	9695,5	-264,5	-0,03
	60	0	34,0	34,0	-
		496	502,6	6,6	0,01
		2000	1953,9	-46,1	-0,02
		9960	9875,9	-84,1	-0,01

### 5.5 Pitkän ajan stabiilisuus

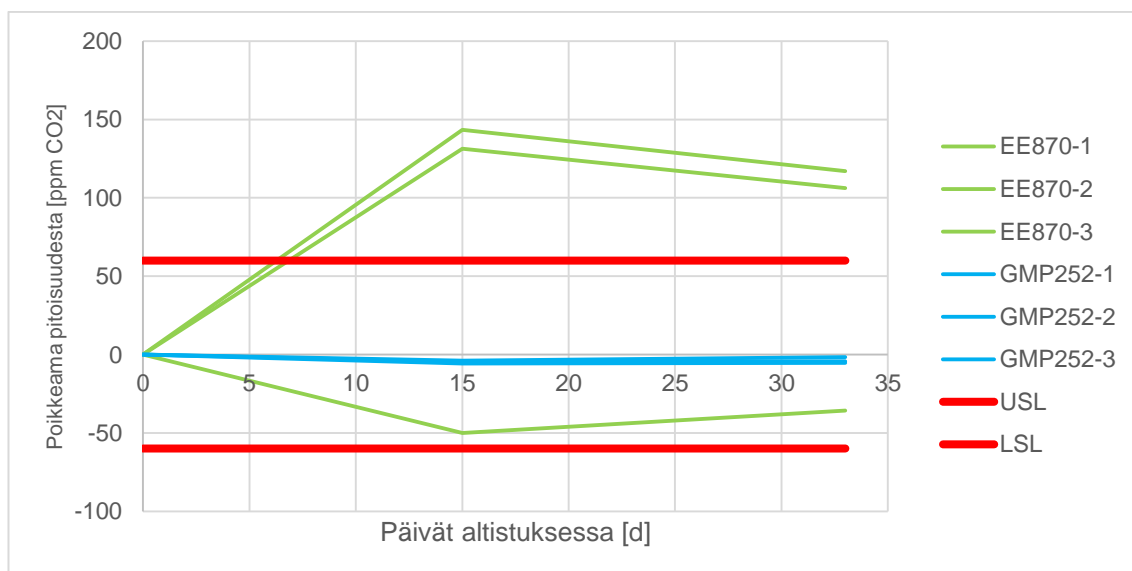
Tässä luvussa esitellään GMP252- ja EE870-mittalaitteiden 33 päivän aikaisen 37 °C / 90 %RH -altistuksen vaikutus mittaussykyyn. Kuvien 27–30 kuvaajissa on esillä yksittäisten mittalaitteiden poikkeamien lisäksi paksuina punaisina viivoina Vaisalan lupaama vuoden stabiilisuus GMP252-tuotteelle (näitä rajoja tuote ei tule ylittämään vuodessa). EE870-tuotteelle ei määrittelyissä ole stabiilisuudesta mainintaa.



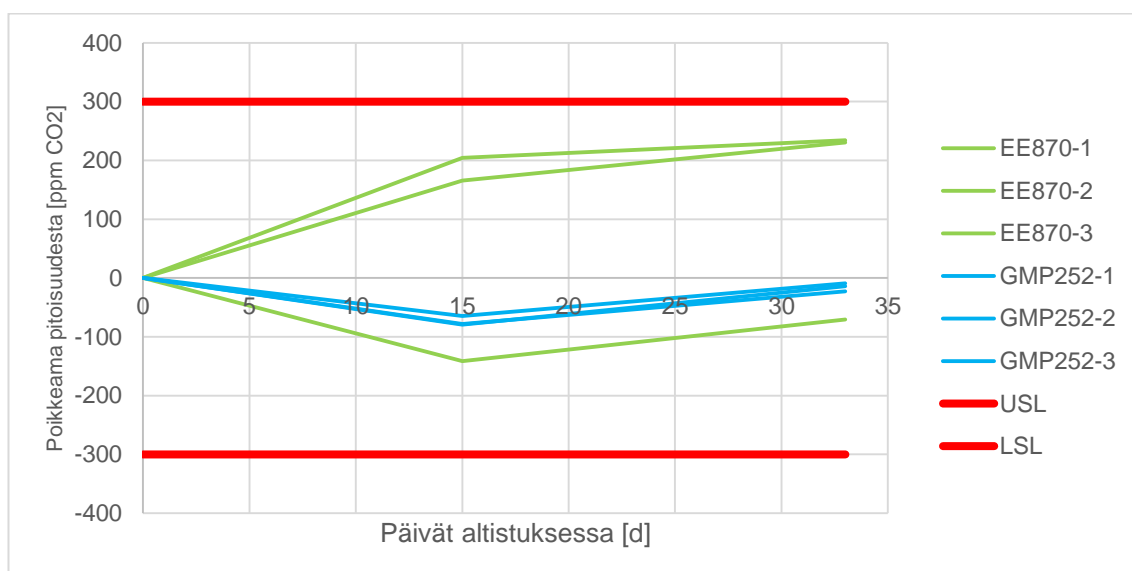
Kuva 27. GMP252- ja EE870-mittalaitteiden lukeman ajelehtiminen pitoisuudessa 0 ppmCO<sub>2</sub>.



Kuva 28. GMP252- ja EE870-mittalaitteiden lukeman ajelehtiminen pitoisuudessa 496 ppmCO<sub>2</sub>.



Kuva 29. GMP252- ja EE870-mittalaitteiden lukeman ajelehtiminen pitoisuudessa 2 000 ppmCO<sub>2</sub>.



Kuva 30. GMP252- ja EE870-mittalaitteiden lukeman ajelehtiminen pitoisuudessa 10 000 ppmCO<sub>2</sub>.

## 6 Tulosten tulkinta

**Mittaustarkkuustestissä** 0 ppm:n pitoisuudessa EE870-mittalaite näytti lähimmäs todellisuutta pitoisuutta. Lopuissa pitoisuuksissa (496, 2 000 ja 10 000 ppmCO<sub>2</sub>) poikkeama oli pienin GMP252:lla. KCD-HP100A ja EE820 poikkesivat kaikissa pitoisuuksissa enemmän kuin GMP252 ja EE870. Jokainen valmistajista on maininnut mittaus-

tarkkuuden määrittämisissä, ja ne täyttyvät jokaisen laitteen kohdalla jokaisessa pitoisuudessa.

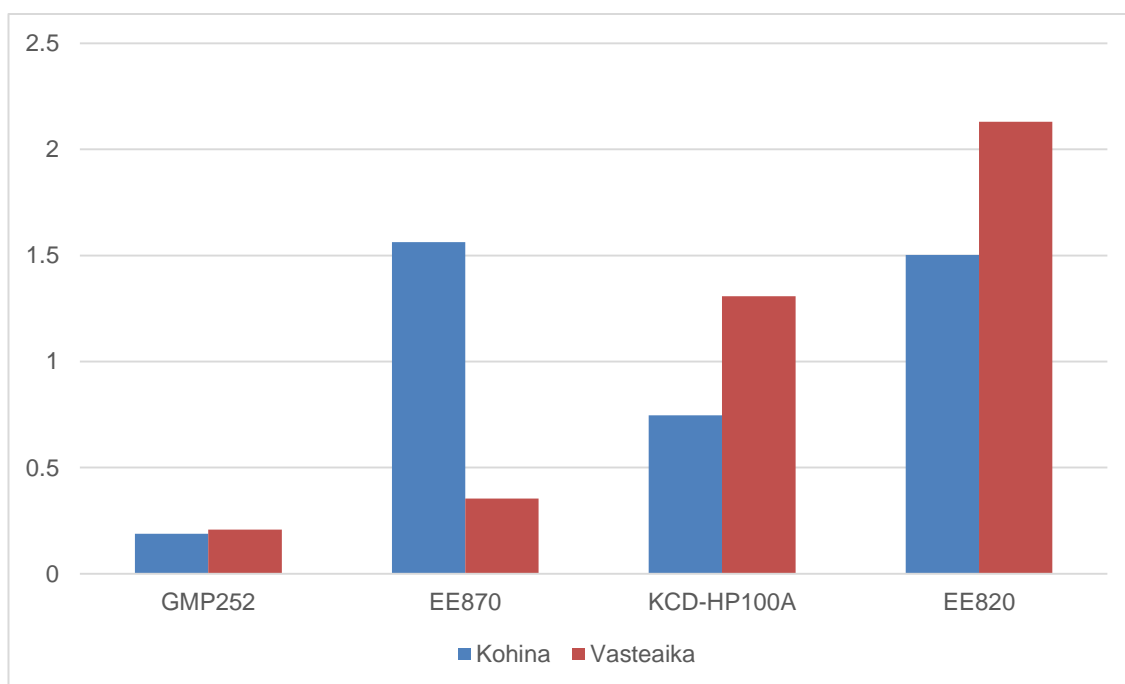
Tuloksista nähdään, että kaikilla mittalaitteilla tarkkuus huononee siirryttäessä korkeisiin pitoisuuksiin. E+E:n seinälähettimessä EE820 tarkkuus on lähtenyt heikkenemään jo 2 000 ppmCO<sub>2</sub> -mittapisteessä, kun taas Vaisalan GMP252:ssa puolestaan tarkkuus vaikuttaisi heikkenevän muihin laitteisiin verrattuna myöhemmässä vaiheessa, vasta 2 000 ppmCO<sub>2</sub> -pitoisuuden jälkeen. Osittain tämä johtuu hiilidioksidin mittaukselle ominaisesta herkkyuden saturoitumisesta korkeissa pitoisuuksissa. Mittapää GMP252, itävaltalaisen E+E:n EE870 ja korealaisen SenseCuben KCD-HP100A on kaikki suunniteltu toimiviksi haastaviin olosuhteisiin ja prosesseihin, joissa pitoisuudet voivat vaihdella laidasta laitaan. E+E mainostaa 820-seinälähetintään lähinnä käytettäväksi sovelluksiin, joissa korkeiden pitoisuuksien tarkka mittaaminen ei ole yhtä tarpeellista, kuten kasvihuoneisiin, hedelmien säilytykseen ja ajoneuvoihin, mikä saattaa osittain selittää, miksi korkeiden pitoisuuksien mittauskäyttöä ei ole kehitetty yhtä korkealle tasolle muiden mittalaitteiden kanssa. Vaikuttaa siltä, että kaikilla laitevalmistajilla on myös paineita laitteiden mittausalueen laajuudelle, minkä seurauksena yläraja asetetaan korkeammalle kuin teknologialla on kyky mitata tarkasti.

GMP252 on mittaustarkkuutensa perusteella muita laitteita soveltuvampi sovelluksiin, joissa vaaditaan hyvää mittaustarkkuutta. EE820-seinälähetin ja KCD-HP100A korkeiden poikkeamiensa takia puolestaan soveltuvat niihin huonoiten.

**Vasteaikatestissä** mitatuista 63 %:n muutokseen kuluneista ajoista nopein oli Vaisalan GMP252 (26 s), toiseksi nopein EE870 (30 s), kolmanneksi nopein KCD-HP100A (173 s) ja hitain EE820 (245 s). 90 %:n muutokseen laitteet pääsivät samassa järjestyksessä. Nopeutetulla vasteajalla hankittu EE820-seinälähetin oli huomattavasti nopeampi kuin muut kaksi EE820-seinälähetintä, mutta jäi silti hitaammaksi kuin KCD-HP100A:t. Nopeasti pitoisuuden muutoksiin reagoivaa laitetta vaativat sovellukset, kuten useat testijärjestelmät, vaativat laitteiltaan nopeaa vasteaikaa, ja tämän työn testien perusteella GMP252 ja EE870 soveltuvat niihin parhaiten. EE820:n hidas vasteaika luultavasti johtuu ison kotelon hitaasta kaasunvaihtoajasta, mutta on perusteltavissa kohdesovelluksilla, kuten ajoneuvot, joissa mittalaitteen vasteajalla ei tyypillisesti ole merkitystä.

Vertailtaessa vasteaikatestituloksia tuotteiden määrittäisiin huomattiin myös EE870:n ja KCD-HP100A:n mitattujen vasteaikojen olevan hitaampia kuin valmistaja lupaa tuotteelleen.

Kuva 31 näyttää, miten laitteissa saatetaan käyttää keskiarvoistusta. Kuvassa laitteiden kohinat ja vasteajat on normalisoitu laitteista laskettujen lukemien keskiarvoon. Näin havaitaan mielenkiintoinen eroavaisuus EE870- ja KCD-HP100A-mittapäiden välillä. EE870:n vasteaika on noin 35 % keskiarvosta, kun taas kohina on keskiarvoon verrattuna 156-prosenttista. Päinvastaisesti, KCD-HP100A:n vasteaika on 131 % keskiarvosta kohinan ollessa vain 75 % keskiarvosta. Tämän perusteella vaikuttaisi siltä, että EE870:ssä juoksevaa keskiarvoistusta ei ole paljoa käytössä, kun taas KCD-HP100A:ssa sitä käytetään enemmän.



Kuva 31. Mitattujen laitteiden kohinat (pitoisuudessa 10 000 ppmCO<sub>2</sub>) ja vasteajat suhteutettuna kaikista laitteista laskettuun keskiarvoon.

**Lämpötilassa mittaamisen testin** tuloksissa nähdään, miten GMP252:n ja EE870:n anturit reagoivat mataliin ja korkeisiin lämpötiloihin. Kuvat 23 ja 24 esittävät graafisesti lukemien keskiarvoisen näyttämävirheen riippuvuuden pitoisuudesta lämpötiloissa -40 ja 60 °C. Poikkeamat ovat luettavissa taulukosta 9.

-40 °C:n mittauksessa GMP252:n virhelukemat pitoisuuksissa 0, 496 ja 2 000 ppmCO<sub>2</sub> (0,0; -45,8; 0,3 edellä mainitussa järjestyksessä) ovat huomattavan pieniä verrattuna EE870:n vastaaviin lukemiin 321,2; 489,2 ja 815,2. 10 000 ppm:n CO<sub>2</sub>-pitoisuudessa puolestaan EE870:n poikkeama (15,9) on pienempi kuin GMP252:n -264,5.

60 °C:ssa molempien mittalaitteiden anturit suoriutuivat pitoisuuksissa 0, 496 ja 2 000 ppmCO<sub>2</sub> hyvin samalla tavalla (GMP252: poikkeamaa 34,0; 6,6; -46,1 ppmCO<sub>2</sub> ja EE870: poikkeamaa 37,7; 19,4; -46,5 ppmCO<sub>2</sub>). 10 000 ppm:n CO<sub>2</sub>-pitoisuudessa kuitenkin GMP252:n -84,1 ppmCO<sub>2</sub> –virhe on pienempi kuin EE870:n -271,3 ppmCO<sub>2</sub>.

Huomioitavaa on, että testi suoritettiin laitteiden lämpötilan suhteen toiminnallisella alueella niin reunalla, ettei lämpötilariippuvuutta ollut sinne asti määritelty. Kuvista 23 ja 24 nähdään lämpötilamallien käyttäytyminen. -40 °C:ssa GMP252:n näyttämä on todellista pitoisuutta matalampi, kun taas EE870:n näyttämä on pitoisuutta korkeampi. Ideaali-kaasulain mukaan lämpötilan laskiessa kaasumolekyylit menevät pienempään tilavuuteen, minkä takia absorptiota tapahtuu enemmän ja se aiheuttaa korkeamman havaitun pitoisuuden. Tästä voidaan päätellä, että EE870-mittapää ei kompensoi lämpötilaa riittävästi matalissa lämpötiloissa. GMP252:lla puolestaan on päinvastainen ongelma: kompensointia tapahtuu hieman liian paljon, ja sen seurauksena lukemat jäävät liian pieneksi. 60 °C:ssa molempien laitteiden lukemat ovat liian pieniä, mikä viittaisi siihen, ettei kumpikaan laite kompensoi lämpötilan aiheuttamaa kaasun tiheyden pienenemistä riittävästi.

EE870:n mittapisteitä tarkkailtaessa on havaittavissa 10 000 ppm:n CO<sub>2</sub>-pitoisuudessa leikkurikäyttäytymistä: näyttämä pysyi laitteilla koko mittauksen 20 minuutin keston lähes täysin samana. Myös pitoisuuteen ylöspäin tultaessa on havaittavissa leikkurin merkkejä, kun näyttämä äkillisesti jää paikalleen kesken jyrkän nousun. Tältä suoralta keskiarvoistettaessa päästään luonnollisesti hyvin lähelle mitattua pitoisuutta, mutta todellinen syy ei välttämättä ole anturin hyvä suoritussyky. Välillä 8 000–10 000 ppm voivat lukemat näyttää huomattavastikin liian korkeita lukemia. Ongelmana on myös se, ettei laite ilmoita törmänneensä leikkuriin millään tavoin. Mikäli liian korkean pitoisuuden raja osuu tuolle epäselväksi jäävälle välille, olisi käyttäjän hyvä tietää, milloin näyttämä on todellinen ja milloin mittalaitteen maksimaalinen arvo. Tämän selville saaminen ei kuitenkaan analogisella ulostulolla varustetuissa mittalaitteissa ole helppoa, sillä rajat ovat mittausten perusteella laitekohtaisia eikä niiden paikallaan pysymisestä pitkän ajan kuluessa ole varmuutta.

**Stabiilisuustestissä** vertailtiin GMP252- ja EE870-mittapäitä. 15 päivän altistuksen jälkeen kahden EE870-mittapään lukemat olivat suurempia kuin altistusta edeltävässä mittauksessa: 0 ppm:ssä muutosta oli tapahtunut 42 ja 63 ppm:ää, 496:ssa ppm:ssä 74 ja 92 ppm:ää, 2 000 ppm:ssä 131 ja 143 ppm:ää ja 10 000 ppm:ssä 204 ja 165 ppm:ää CO<sub>2</sub>. Vaisalan kolmen laitteen lukemat vastaavissa pitoisuuksissa olivat -2, -1, -2; -4, -2, -6; -5, -4, -6 ja -65, -78 ja -80. Yhden EE870:n lukema puolestaan lähti ajelehtimaan alaspäin alkuperäisestä kalibroinnin tarkistuksesta. Altistuksen aiheuttamat poikkeamat olivat 15 päivän kohdalla E+E:n laitteilla huomattavasti suuremmat kuin GMP252:lla. 33 päivän pisteitä tarkasteltaessa huomataan, ettei jälkimmäisellä altistuspätkällä 15 päivän aikaisten muutosten kaltaisia eroja havaittu. Peräkkäisten pisteiden erotuksia molemmilla laitetyypeillä laskettaessa huomataan, että erot ovat niin pieniä, että ne mahtuvat GMP252:n määrittelemän kalibrointiepävarmuuden marginaalin sisään.

## 7 Johtopäätökset

Hiilidioksidin mittaustarkkuus- ja stabiilisuustesteissä havaittiin, että Vaisala Oyj:n GMP252-mittapäässä aallonpituuksien säätämiseen käytetty Fabry–Pérot'n interferometri on toimivia, tarkka ja stabiili ratkaisu kahden aallonpituuden NDIR-anturin toteuttamiseksi. Kahta kaistanpäästösuodinta ja kahta ilmaisinta käyttävät anturit eivät yltäneet FPI:tä käyttävän anturin suorituskykyyn ja stabiilisuuteen. Hyvin pienikohinaisista lukemista ja hyvin vähän ajelehtivista stabiilisuustuloksista voidaan todeta myös, että GMP252:ssa valonlähteenä käytetty Vaisalan patentoitu mikrohehku tuottaa hyvää ja tasaista signaalia ja on erinomainen valonlähdevalinta NDIR-anturiin.

Nopeaksi vasteajaltaan havaittiin laitteet, joiden anturin tilavuus oli pieni ja joiden anturin rakenne oli mahdollisimman avoin siten, että kaasu pääsi helposti diffusoitumaan. GMP252:n avoinrakenteisen kyvetin sijaitessa suoraan kierrettävän PTFE-suodattimen alla vasteaikojen havaittiin olevan muihin laitteisiin verrattuna todella hyviä. E+E:n antureissa puolestaan rakenne oli suljettu ja kaasunottoaukko melko pieni, mikä hankaloitti kaasun pääsemistä mittaustilaan. Suurempitilavuuksisella anturilla varustetun KCD-HP100A:n ja suurikoteloisen EE820:n havaittiin olevan vasteajaltaan hitaampia.



Koska Vaisalan GMP252 suoriutui mittaustarkkuus-, vasteaika-, lämpötilassa mittausta ja stabiilisuustesteistä parhaiten, voidaan testien perusteella todeta, että laitteen mittauskyky on muihin tässä työssä testattuihin laitteisiin verrattuna erinomainen. Laite näin ollen soveltunee muita paremmin näitä ominaisuuksia tärkeinä pitäviin sovelluksiin, kuten kasvihuoneisiin.

Laitteiden suorituskyky on kuitenkin edellä mainittujen seikkojen lisäksi riippuvainen myös laitteen sisäisestä matematiikasta. Laitteiden linearisointi ja paine- sekä lämpötilamallit ovat vaikuttaneet mittaussykyyn testien aikana, mutta näitä seikkoja ei laitteiden välillä pystytty vertailemaan, koska valmistajat eivät pidä niiden julkaisemista tarpeellisena.

Laittevertailua voi tämän työn jälkeen jatkaa suorittamalla laitteille testejä, joita tässä työssä ei ole suoritettu (esim. mekaanisia testejä), jatkamalla stabiilisuustestiä tai tuomalla mukaan uusia laitteita sitä mukaa, kuin niitä tuodaan markkinoille. Myös laitteiden laskennan analysoinnilla saataisiin paljon tietoa, mikäli siihen jollain tapaa päästäisiin käsiksi.

Työn mittaustulokset paransivat Vaisalan markkinoinnin ja tuotekehityksen käsitystä siitä, missä asioissa ollaan muita valmistajia edellä ja mitä voitaisiin vielä parantaa. Testeissä saatiin kokemusta laitteiden testauksen, datan tulkinnan ja testilaitteistojen kokoamisen haasteista.

## Lähteet

- 1 ESRL Integrating Research and Technology Theme: Carbon Cycle Science. Verkkodokumentti. ESRL. <<http://www.esrl.noaa.gov/research/themes/carbon/>>. Luettu 6.6.2016.
- 2 Reichstein, M. 2013. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*. Vol. 500:7462, s. 287–295.
- 3 CO2 Meters. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj. <<http://www.vaisala.com/en/industrialmeasurements/products/carbondioxide/Pages/default.aspx>>. Luettu 1.8.2016.
- 4 Day-Night Temperatures and CO2 Enrichment. Verkkodokumentti. Quick Grow. <[http://www.quickgrow.com/gardening\\_articles/co2\\_enrichment.html](http://www.quickgrow.com/gardening_articles/co2_enrichment.html)>. Luettu 8.6.2016.
- 5 PH & CO2 Levels. Verkkodokumentti. Thermo Fisher. <<https://www.thermofisher.com/fi/en/home/references/gibco-cell-culture-basics/cell-culture-environment/ph-co2-levels.html>>. Luettu 8.6.2016.
- 6 Zosel, J. & Oelßner, W. & Decker, M. & Gerlach G. & Guth U. 2011. The measurement of dissolved and gaseous carbon dioxide concentration. *Measurement Science and Technology*.
- 7 Severinghaus, J. W. 2004. First electrodes for blood pO<sub>2</sub> and pCO<sub>2</sub> determination. *J Appl Physiol*, s. 1599–1600.
- 8 US 2212211. 1938. Apparatus for detecting and measuring heteroatomic gases. Pfundt A. H. (Pfundt A. H.)
- 9 Mendes L.B. & Ogink N. W. M. & Edouard, N. & van Dooren, H. J. C. & Tinôco, I. d. F. F. & Mosquera, J. 2015. NDIR Gas Sensor for Spatial Monitoring of Carbon Dioxide Concentrations in Naturally Ventilated Livestock Buildings. *Sensors*. Vol. 15:5, s. 11239–11257.
- 10 Neethirajan, S & Jayas, D. & Sadistap S. 2009. Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Sensors for the Agri-food Industry - A Review. *Food and Bioprocess Technology*. Vol. 2:2, s. 115–121.

- 11 What is CO<sub>2</sub>. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Measurement%20Theory/WhatIsCO2.pdf>>. Luettu 13.6.2016.
- 12 Kuivajää (hiilidioksidijää). Verkkodokumentti. Woikoski.  
<<http://www.woikoski.fi/fi/yksityisille/muut-tuotteet/kuivajaa-hiilidioksidijaa>>. Luettu 15.8.2016.
- 13 Severinghaus, J. W. & Bradley, A. F. 1958. Electrodes for Blood pO<sub>2</sub> and pCO<sub>2</sub> Determination. Maryland: National Heart Institute.
- 14 Infrared Gas Sensors. Verkkodokumentti. International Sensor Technology.  
<<http://www.intlsensor.com/pdf/infrared.pdf>>. Luettu 4.8.2016.
- 15 Number of vibrational nodes for a molecule. Verkkodokumentti. LibreTexts.org.  
<[http://chem.libretexts.org/Core/Physical\\_Chemistry/Spectroscopy/Vibrational\\_Spectroscopy/Vibrational\\_Modes/Number\\_of\\_vibrational\\_modes\\_for\\_a\\_molecule](http://chem.libretexts.org/Core/Physical_Chemistry/Spectroscopy/Vibrational_Spectroscopy/Vibrational_Modes/Number_of_vibrational_modes_for_a_molecule)>. Luettu 4.8.2016.
- 16 Greenhouse Gases. Verkkodokumentti. Shapley.  
<<http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/genchem1/l15/web-l15.pdf>>. Luettu 4.8.2016.
- 17 Reusch, W. 2013. Infrared Spectroscopy. Michigan State University.
- 18 Infrared Spectroscopy. Verkkodokumentti. Caltech.  
<<http://www.wag.caltech.edu/home/jang/genchem/infrared.htm>>. Luettu 4.8.2016.
- 19 CO<sub>2</sub> Measurement. Verkkodokumentti. E+E.  
<<http://www.epluse.com/en/products/co2-measurement/>>. Luettu 29.7.2016.
- 20 Vaisala CARBOCAP® Sensor for Measuring Carbon Dioxide. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/CE-N-G-CARBOCAP-Technology-description-B210780EN.pdf>>. Luettu 3.8.2016.
- 21 Pandey, S. K. & Kim K.-H. 2007. The Relative Performance of NDIR-based Sensors in the Real-time Analysis of CO<sub>2</sub> in Air. Sensors. Vol. 7:7, s. 1683–1696.
- 22 Baschant, D. & Stahl, H. 2004. Temperature resistant IR-gas sensor for CO<sub>2</sub> and HO<sub>2</sub>. Sensors.

- 23 How to Measure Carbon Dioxide. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228EN-A.pdf>>. Luettu 7.6.2016.
- 24 Gibson, D. & MacGregor, C. 2013. A novel solid state non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> gas sensor compatible with wireless and portable deployment.
- 25 Han J.-H. & Han S.-W. & Kim S.-M. & Pak J.-J. & Moon S. 2013. High Detection Performance of NDIR CO<sub>2</sub> Sensor Using Stair-Tapered Reflector. IEEE Sensors Journal. Vol. 13:8, s. 3090–3097.
- 26 LMP91051 NDIR CO<sub>2</sub> Gas Detection System. Verkkodokumentti. Texas Instrument. <<http://www.ti.com/lit/an/snaa207/snaa207.pdf>>. Luettu 10.8.2016.
- 27 Infrared Sensor Technology and its Impact on HVAC CO<sub>2</sub> Measurement Accuracy. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/CEN-TIA-HVAC-CO2-Measurement-Accuracy-B211311EN-A.pdf>>. Luettu 2.6.2016.
- 28 Understanding your CO<sub>2</sub> Sensor. Verkkodokumentti. CO<sub>2</sub>Meter.com.  
<<https://cdn.shopify.com/s/files/1/0019/5952/files/ABC-calibration.pdf?1285616113>>. Luettu 8.6.2016.
- 29 Parttimaa, J. 2012. Fabryn ja Pérot'n interferometri. Jyväskylän yliopisto.
- 30 Equation of State (Ideal Gas). Verkkodokumentti. NASA.  
<<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/eqstat.html>>. Luettu 2.8.2016.
- 31 Nave, C. 2016. Ideal Gas Law. Georgia State University.
- 32 IUPAC. 1997. Compendium of Chemical Terminology. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- 33 GMP252 User Guide. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/GMP252-User-Guide-M211897EN.pdf>>. Luettu 1.8.2016.
- 34 EE870 Modular CO<sub>2</sub> Transmitter for Demanding Applications. Verkkodokumentti. E+E.  
<[http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/ee870/Datasheet\\_EE870.pdf](http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/ee870/Datasheet_EE870.pdf)>. Luettu 4.8.2016.

- 35 Ingress Protection (IP) Rating. Verkkodokumentti. Omron.  
<<http://www.omron.com/ecb/products/pdf/protection.pdf>>. Luettu 25.7.2016.
- 36 GMP252 Carbon Dioxide Probe for ppm-Level Measurements. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/CEN-G-GMP252-Datasheet-B211567EN.pdf>>. Luettu 4.8.2016.
- 37 Accredited or Certified? Answers to the Seven Most Frequently Asked Questions about Accreditation. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-TIA-Parameter-7-Answers-Application-Note-B211252EN-B.pdf>>. Luettu 1.8.2016.
- 38 Accredited Calibration. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.com/en/services/calibration-and-repair/Pages/Accredited-Calibrations.aspx>>. Luettu 1.8.2016.
- 39 E+E, "E+E Elektronik Offers Accredited Calibrations for CO<sub>2</sub>," 2016. [Online]. Available: <http://www.epluse.com/en/press/press-releases/info/e-e-elektronik-offers-accredited-calibrations-for-co2-59/>. [Haettu 1 August 2016].
- 40 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Verkkodokumentti. ISO.  
<[http://www.dc.mahidol.ac.th/th/images/2014/content\\_th/ISO\\_Wada/iso17025\\_eng.pdf](http://www.dc.mahidol.ac.th/th/images/2014/content_th/ISO_Wada/iso17025_eng.pdf)>. Luettu 29.7.2016.
- 41 KCD-HP CO<sub>2</sub> Sensor Probe (1%, 10%, 20%). Verkkodokumentti. Korea Digital Co., Ltd. <[http://www.sensecube.com/eng/product/pdf/kcd\\_hp\\_en\\_110602.pdf](http://www.sensecube.com/eng/product/pdf/kcd_hp_en_110602.pdf)>. Luettu 8.8.2016.
- 42 CO<sub>2</sub> Transmitter for Demanding Applications. Verkkodokumentti. E+E.  
<[http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/EE820/datasheet\\_EE820.pdf](http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/product/EE820/datasheet_EE820.pdf)>. Luettu 8.8.2016.
- 43 Vaisala CARBOCAP® Carbon Dioxide Probe GMP252 for ppm-level Measurements. Verkkodokumentti. Vaisala Oyj.  
<<http://www.vaisala.com/en/products/carbondioxide/Pages/GMP252.aspx>>. Luettu 9.8.2016.
- 44 Open Source Six Sigma. 2007. Lean Six Sigma Green Belt. Open Source Six Sigma Publication.
- 45 AGA. 2016. AGAn kaasuturvallisuuskoulutus. Vantaa: AGA.

- 46 Nelson, W. B. 2009. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data analysis. John Wiley & Sons. s. 616.
  
- 47 Temperature and Humidity Testing (Damp Heat Test). Verkkodokumentti. IST Group.  
<[http://www.istgroup.com/english/3\\_service/03\\_01\\_detail.php?MID=2&SID=49](http://www.istgroup.com/english/3_service/03_01_detail.php?MID=2&SID=49)>.  
Luettu 25.7.2016.
  
- 48 KOTEL. 2003. Ympäristöolosuhdetestiivistelmät. Espoo.